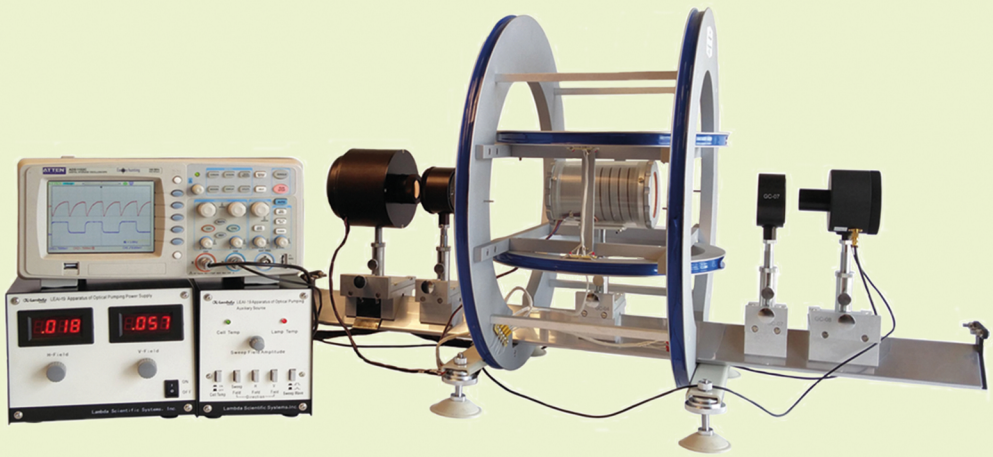
В. Г. ЖИТАРЮК

ПРИЛАДОЗНАВСТВО

Проєкт і конструкція приладів



Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

В. Г. Житарюк

ПРИЛАДОЗНАВСТВО

Проєкт і конструкція приладів

Монографія



Чернівці
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича
2024

УДК 681.2 (07)
Ж 74

Друкується за ухвалою Вченої ради
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
(протокол №15 від 27 грудня 2023 року)

Рецензенти:

В. М. Атаманюк, доктор технічних наук, професор Національного університету «Львівська політехніка»;

І. М. Озарків, доктор технічних. наук, професор Національного лісотехнічного університету України, дійсний член-академік інженерної Академії наук України.

Житарюк В.Г.

Ж 74 Приладознавство: проєкт і конструкція приладів: монографія / В. Г. Житарюк. – Чернівці: Чернівец. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2024. 372 с.

ISBN 978-966-423-861-5

Передумовою створення нових приладів має бути низка положень, виконання яких надають виробу необхідних функціональних, ергономічних та естетичних властивостей з одного боку, а з іншого – безпечності оператора та безпеки середовища розташування виробу при його експлуатації. У книзі сформульовано *системний підхід* до названих властивостей, який полягає у членуванні структури приладу на *функціональну* і *геометричну* та створення власного базису кожної складової. *Базисом функціональної структури* виступає *рівнева* модель. Геометрична структура членується на два рівні – *зовнішній* та *внутрішній*. *Базисом зовнішньої структури* виступає модифікована діаграма Вена. *Внутрішня структура* будується відповідно до принципу побудови і схем складання – монолітна, блочно-модульна чи конструкція з центральним функціональним модулем. Висвітлено *теорію точності* роботи приладів. Викладено основи технічної естетики, ергономіки, фізіологічного базису операторської діяльності та художньо-конструкторського розв'язку виробів.

Для інженерно-технічних працівників в галузі проєктування і конструювання технічних систем, а також для студентів інженерних спеціальностей з приладобудування та експлуатації приладів.

© Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, 2024

ISBN 978-966-423-861-5 © В.Г. Житарюк, 2024

ЗМІСТ

Передмова 10

1. Вступна частина 12
1.1. Базові поняття 12
1.2. Назва, функції, класифікація приладів, їх номенклатура 13
1.2.1. Назва приладів 13
1.2.2. Функції приладів 14
1.2.3. Класифікація та номенклатура приладів 15
1.2.3.1. Вимірювальна техніка 15
1.2.3.2. Прилади перетворення енергії 17
1.2.3.3. Технологічні функції приладів (апарати) 17
1.3. Структура виробу 18
1.3.1. Поняття структури, її класифікація 18
1.3.2. Класифікація виробів 19
1.3.3. Застосування технічного виробу 21
1.4. Етапи та стадії створення нових технічних систем 22
1.4.1. Етап проєктування 24
1.4.2. Етап конструювання 25
1.5. Конструкторські документи 26
1.6. Навчальний процес 29

2. Функціональна структура приладу

2.1. Рівнева модель функціональної структури 30
2.2. Перший рівень функціональної структури:
датчик фізичної величини 30
2.2.1. Поняття сигналу та інформації 30
2.2.2. Перетворення фізичного поля у представницьку величину 35
2.2.3. Перетворення механічних величин 40
2.2.4. Вимірювання механічних величин (сила, деформація,
переміщення) з генерацією електричних величин 41
2.2.4.1. П'єзоелектричні чутливі елементи 41
2.2.4.2. Магніточутливі елементи: елементи Холла і магнітоопори 43
2.2.4.3. Тензорезистори 44
2.2.5. Перетворення електричних величин 46
2.2.5.1. Індуктивні чутливі елементи 46
2.2.5.2. Ємнісні чутливі елементи 49
2.2.5.3. Перетворення на основі зміни електричного опору 51
2.2.6. Перетворювачі оптичного випромінювання 54
2.2.6.1. Використання явища фотоефекту 54
2.2.6.2. Вимірювальні перетворювачі з цифровим
вихідним сигналом (матриці фотоприймачів) 57
2.2.6.2.1. Загальні відомості 57
2.2.6.2.2. Характеристика матриць 58

2.2.6.2.3. Параметри матриць 60
2.3. II-й рівень – рівень функціональних перетворень 64
2.3.1. Вступ 64
2.3.2. Функція перетворення сигналу 65
2.3.3. Передаточні функції в перетвореннях сигналу 67

2.4. III рівень: підсилення перетвореної величини 70
2.5. IV рівень – рівень технологічних функцій 72
2.6. Комуніканти 74

3. Рівень надійності, забезпечення, керування

3.1. Надійність технічної системи 76
3.1.1.Базові означення 76
3.1.2. Стадії роботи виробів нової техніки 76
3.1.3. Класифікація відмов за технічними ознаками 77
3.1.4. Причини зміни технічного стану устаткування в процесі роботи 81
3.1.5. Причини відмов 83
3.2. Забезпечення роботи приладів (апаратів) 83
3.2.1. Забезпечення метрологічної єдності вимірювальних величин 84
3.2.1.1. Принцип послідовної структури 84
3.2.1.2. Принцип паралельної структури 86
3.2.1.3. Компенсаційний принцип: нуль-схема, (метод урівноваженого перетворення) 87
3.2.2. Забезпечення енергоживлення: блоки живлення; стабілізація електричних величин, перетворення частоти 88
3.2.2.1. Передмова 88
3.2.2.2. Класифікація джерел живлення 89
3.2.2.3. Характеристики джерел електроживлення 89
3.2.2.4. Випростування 91
3.2.2.5.Нестабілізовані джерела електроживлення 92
3.2.2.6. Стабілізовані джерела живлення 93
3.2.2.7. Джерела змінної напруги з живленням від промислової електромережі 96
3.2.2.8. Джерела електроживлення з постійною вхідною напругою 98
3.2.3. Забезпечення механічних переміщень 99
3.2.3.1. Механічні передачі (загальні питання) 99
3.2.3.2. Кінематика зубчатих передач 99
3.2.3.3. Елементи динаміки механічних передач 101
3.2.3.4. Електродвигуни 101
3.2.3.5. Електромагніти 103
3.2.4. Позиціонування елементної бази 104
3.2.4.1. Вступні поняття 104
3.2.4.2. Способи позиціонування 105
3.2.4.3. Точність позиціонування 108
3.2.4.4. Способи та засоби переміщень 109
3.2.4.5. Режими позиціонування 110
3.3.5. Керування роботою приладів (апаратів) 112

4. Захист приладів і оточення

4.1. Вступні положення 113
4.2. Захист від кліматичних дій і зовнішніх впливів 113
4.2.1. Кліматичні зони та райони; кліматограма 113
4.2.2. Класи виконання, експлуатації та випробувань 115
4.2.3. Захист від дотику, проникнення сторонніх предметів, води; ступені захисту 119
4.2.4. Захист від корозії; загальні питання 121
4.2.5. Вибір матеріалу і захист поверхні 123
4.2.6. Конструювання систем захисту. Герметизація 125

4.3. Захист від електричного удару 127
4.3.1. Вступ 127
4.3.2. Захист від прямого дотику при нормальній роботі 128
4.3.3. Захист від побічного допуску в разі помилки 129
4.3.4. Класи захисту 129
4.3.4.1. Клас захисту I: захисне заземлення 130
4.3.4.2. Клас захисту II: захисна ізоляція 131
4.3.4.3. Клас захисту III: захисна понижена напруга 132
4.4. Захист приладів від полів електричної та магнітної природи 133
4.4.1. Вступні положення 133
4.4.1.1. Проблеми впливу 133
4.4.1.2. Поняття полів 133
4.4.1.3. Класифікація електромагнітних полів 134
4.4.1.4. Основні джерела полів 135
4.4.2. Заходи захисту від електричних та магнітних полів 136
4.4.2.1. Методичні заходи 136
4.4.2.2. Технічні заходи: екранування полів 137
4.4.2.3. Характеристика екранів 138
4.4.3. Методика розрахунків екранів 139
4.4.3.1. Алгоритм розрахунків 139
4.4.3.2. Екранування електричних полів 140
4.4.3.3. Екранування магнітних полів низької частоти 141
4.4.3.4. Принципи екранування магнітних полів високої частоти 141
4.4.3.5. Узагальнення 142
4.4.4. Мережа живлення 143
4.4.5. Граничні значення радіозавад, що випромінюються приладами 145
4.5. Тепловий захист приладів 145
4.5.1. Вступ 145
4.5.2. Фізичні основи теплових процесів 147
4.5.3. Термодинамічна модель приладу 148
4.5.4. Теплові явища та процеси 149
4.5.4.1. Теплопровідність 149
4.5.4.2. Теплове випромінювання 152
4.5.4.3. Конвекція 156

4.5.5. Тепловідвід з приладів 158
4.5.5.1. Постановка задачі 158
4.5.5.2. Тепловідвід теплопровідністю 160
4.5.5.3. Тепловідвід випромінюванням 161
4.5.5.4. Тепловідвід конвекцією 164
4.5.5.5. Тепловідвід з використанням термоелектричних ефектів 165
4.5.5.6. Тепловідвід тепловими трубами 166
4.5.5.7. Розташування джерел тепла 167
4.5.5.8. Радіатори 168
4.6. Захист технічних систем від механічних навантажень 168
4.6.1. Основні положення 168
4.6.2. Джерела механічних навантажень 169
4.6.3. Функції збудження, частоти збудження і власні частоти 169
4.6.4. Динамічна модель захисту від коливань та ударів 172
4.6.5. Технічна реалізація захисту від механічних впливів 172
4.6.5.1. Суть питання 172
4.6.5.2. Демпфування коливальних та ударних навантажень 173
4.6.5.3. Принципи гасіння коливань 174
4.6.5.4. Конструктивні рішення ізоляції коливань та ударів; віброгасники та амортизатори 174
4.7. Захист від звуку та шуму 176
4.7.1. Фізичні характеристики звуку та їх визначення 177
4.7.2. Природа виникнення шуму в технічних системах 179
4.7.3. Зниження генерації звуку технічною системою 180
4.7.3.1. Загальні питання 180
4.7.3.2. Зменшення збуджуючої сили 181
4.7.3.3. Ізоляція структурного звуку 184
4.7.3.4. Ізоляція повітряного звуку 184
4.7.3.5. Звукоізоляція типових конструктивних елементів приладів 185

5. Теорія точності роботи приладів

5.1. Анотація 188
5.2. Вступне слово 188
5.3. Основне рівняння лінійної теорії точності; структура похибок 190
5.4. Методи визначення похибок 192
5.5. Аналіз видів похибок 194
5.5.1. Теоретичні похибки (похибки групи „A”) 194
5.5.1.1. Схемні теоретичні похибки 195
5.5.1.2. Параметричні похибки 197
5.5.1.3. Конструктивні припущення 198
5.5.2. Технологічні (первинні) похибки (група „B”) 198
5.5.2.1. Вступні поняття 198
5.5.2.2. Розрахунки скалярних технологічних похибок 199
5.5.3. Похибки експлуатації (група „C”) 200
5.5.4. Похибки зчитування (реєстрації) сигналу (група „D”) 201

5.5.4.1. Спотворення істинного значення інформаційного параметра 202
5.5.4.2. Методичні похибки (похибки представництва) 202
5.6. Корекція показань приладу внаслідок зовнішніх збурень 202
5.7. Розрахунки параметрів ланок перетворення руху механізмів та похибок виконання дій 204
5.7.1. Класифікація похибок механізмів 204
5.7.2. Розрахунки параметрів ланок індикатора годинникового типу 204
5.7.3. Приклади розрахунків похибок 209
5.7.4. Установлення функції перетворення сигналу (ФПС) трубчатого манометра та розрахунок похибок 211

6. Технічна естетики, ергономіка та інженерна психологія

6.1. Технічна естетика 216
6.1.1. Суть та зміст дисципліни 216
6.1.2. Зародження технічної естетики 216
6.1.3. Стан розвитку 218
6.2. Ергономіка та інженерна психологія 222
6.2.1. Суть та зміст дисциплін 222
6.2.2. Задачі і завдання 224
6.2.3. Методи досліджень в інженерній психології та ергономіці 225
6.3. Психо-фізіологічний базис операторської діяльності (рецептивні властивості людини) 226
6.3.1. Вступні положення 226
6.3.2. Характеристика зорового аналізатора 227
6.3.2.1. Загальна інформація 227
6.3.2.2. Чутливість зору 228
6.3.2.3. Кольорове сприйняття 228
6.3.2.4. Гострота зору, його інерційність 229
6.3.2.5. Інформаційне поле зорового сприйняття 231
6.3.3. Слуховий аналізатор 232
6.3.4. Інші аналізатори та взаємодія аналізаторних систем 235
6.3.5. Антропометричні вимоги та умови в конструюванні 238
6.3.6. Біомеханіка в конструюванні 245
6.3.6.1. Основні поняття 245
6.3.6.2. Ступені вільності і зв'язку рухів (переміщень) 246
6.3.6.3. Структурна схема опорно-рухового апарата людини 248
6.3.6.4. Біомеханічні характеристики 250
6.3.6.5. Психофізіологічні здібності та реакції людини 252
6.3.6.6. Моторна діяльність оператора 255
6.3.7. Симетрія та асиметрія фізіологічних властивостей людини 257
6.3.8. Пізнавальні процеси, мислення та увага 259

7. Зовнішня геометрична структура виробів

7.1. Фактори впливу на зовнішню форму виробу 263

7.2. Функції зовнішньої структури 264
7.2.1. Технічна функція 264
7.2.1.1. Конструктивні елементи забезпечення технічної функції 264
7.2.1.2. Характеристика апаратури 265
7.2.1.3. Захист технічної системи 265
7.2.1.4. Такелаж 266
7.2.2. Ергономічна функція 267
7.2.2.1. Вступне слово 267
7.2.2.2. Ергономічні навантаження 268
7.2.2.3. Питання сумісності технічного засобу та людини 271
7.2.3. Естетична функція 271
7.3. Художньо-конструкторський розв'язок технічної системи 272
7.3.1. Зміст діяльності 272
*7.3.2. З*асоби *х*удожньо-конструкторських рішень 274
7.3.3. Форма виробів 275
7.3.3.1. Загальні положення 275
7.3.3.2. Сприйняття людиною зовнішньої геометричної форми 276
7.3.3.3. Закон Вебера – Фехнера (збудження - відчуття - сприйняття) 276
7.3.3.4. Закон привабливої візуальної форми 276
7.3.3.5. Закон одночасності 277
7.3.3.6. Формоутворення виробів 277
7.3.3.7. Засоби та способи впорядкування форми 278
7.3.3.8. Вибір форми об'єднаної сукупності приладів 279
7.3.4. Інструменти художньо-конструкторських рішень 280
7.3.4.1. Композиція 280
7.3.4.2. Компонування 284
7.3.5. Кольоровий чинник у зовнішній структурі виробу 284
7.3.5.1. Загальна інформація 284
7.3.5.2. Властивості та особливості дії кольору 285
7.3.6. Вибір та призначення кольорів 288
7.3.6.1. Колір як інструмент художнього конструювання 288
7.3.6.2. Колористичні контрасти 290
7.3.6.3. Колористичні рішення фону, функціональних зон та зон управління 290
7.4. Засоби та інструменти реалізації технічної функції 291
7.4.1. Вступ 291
7.4.2. Елементи зв'язку в системі «людина – прилад» 292
7.4.2.1. Робоча зона елементів зв'язку; преамбула 292
7.4.2.2. Геометрія робочої зони 293
7.4.2.3. Розташування елементів зв'язку 293
7.5. Знакова інформація 295
7.6. Органи керування (homos-комуніканти) 297
7.7. Групове використання приладів та пульти керування 299
7.8. Ергономічна оцінка систем "людина-машина" 300
Додаток 7.1. Європейський стандарт ЄН 614-1-95:

Ергономічні принципи конструювання: безпека обладнання 302

8. Внутрішня геометрична структура

8.1. Преамбула 314

8.1.1. Функціональна класифікація 314
8.1.2. Принцип складання та ієрархія розбудови 315
8.2. Блочно-модульні конструкції 317
8.2.1. Несучі конструкції 317
8.2.2. Принцип віяльного складання 318
8.2.2.1. Ієрархія розбудови електронних приладів 318
8.2.2.2. Основні переваги блочно-модульних конструкцій 320
8.2.3. Електронні вироби у модульному виконанні 320
8.2.4. Електромонтаж 323
8.3. Прилад з спільною базою: моноблочні конструкції 324
8.3.1. Класифікація 324
8.3.2. Характеристика 324
8.3.3. Базові елементи 327
8.4. Уніфіковані комплекси із центральним функціональним модулем 329
8.5. Компонування елементної бази (Б.Е.) 329
8.5.1. Загальні правила 329
8.5.2. Проблеми компоновки 330
8.5.3. Процес компоновки 331
8.5.4. Методи компоновки 331
8.5.4.1. Метод перебору 331
3.5.4.2. Метод інверсії 334
8.5.4.3. Метод суміщення функцій 335
8.6. Компоновка оптико-механічних систем 336
8.7. Установка елементної бази 338

Додатки. З історії становлення та розвитку техніки

1. Етапи становлення інженерної справи 340
2. Віхи розвитку техніки 342
2.1. Первісна техніка (до 4 тис. до н.е.) 342
2.2. Підсумки розвитку античної техніки (4 тис. до н.е. – V ст.) 342
2.3. Підсумки розвитку середньовічної техніки (У - XVI ст.) 343
2.4. Підсумки розвитку техніки епохи мануфактурного виробництва (17 ст. – 1760 р.) 344
2.5. Техніка епохи промислового перевороту (1760 – 1870 рр.) 344
2.6. Підсумки розвитку техніки епохи індустріалізації (1870 – 1940 рр.) 345
3. Нариси з історії приладів 347
3.1 . Класичний період 347
3.2. Розвиток та становлення обчислювально-комп'ютерної техніки 360
3.3. Матричні цифрові фотоприймачі 363

Список літератури 367

Передмова

Прилад – особливий продукт людського генія, початкове призначення якого – задоволення цікавості та допитливості людини, її потягу до знань та розширення інформаційного кругозору. З історичного ходу розвитку людства будемо розрізняти донауковий період, період становлення знань, аналоговий науковий та сучасний цифровий комп'ютеризований світ. Відповідно до названих етапів, здійснювався розвиток приладобудування, розширювалась сфера застосувань цих, за сучасною мовою, девайсів. На сьогодення, окрім отримання інформації про зовнішній світ, до функцій приладів відносимо генерацію фізичних полів та застосування у технологіях для спрощення та полегшення участі людини у виробництві. Ці три складові – це технічна класифікація приладів за призначенням. Для повноти означення прилади наділяємо ще й соціальними функціями, зміст яких розкривається у вступній частині.

Назви книги: «Приладознавство: проєкт та конструкція приладів». Отже, головна назва – «Приладознавство». Цим підкреслюється основне призначення книги – навчальне, тобто підручник, або ж навчальний посібник, є путівником для студентів, які тільки-но оволодівають азами даної науки. На нашу думку, цей підхід має сформувати у студента цілісну систему знань про прилад на основі *системного підходу*, побудованого на членуванні структури приладу (і не тільки приладу) на *функціональну* і *геометричну* та створення власного базису кожної складової. *Базисом функціональної структури* приладу виступає його *рівнева* модель [8], яка включає в себе шість рівнів: чотири – головні, забезпечують проходження сигналу з наступним зчитуванням, а два – допоміжні, один з яких – це забезпечення та керування роботою приладом, інший – рівень захисту. Останній розчленований на сім груп відповідно фізичної природи завад та збурень. *Геометрична структура* членується на два рівні – *зовнішній* та *внутрішній*. *Базисом зовнішньої структури* виступає модифікована діаграма Вена [59], яка висвітлює чотири функції зовнішньої структури: технічну, ергономічну, естетичну та захист внутрішньої структури від зовнішніх впливів. *Внутрішня структура* формується відповідно до принципу побудови і схеми складання – монолітна, блочно-модульна конструкція або ж уніфіковані комплекси з центральним функціональним модулем. Окремим розглядом висвітлений *базис теорії точності* роботи приладів [46]. Представлений матеріал з т*ехнічної естетики, ергономіки та психо-фізіологічних основ* операторської діяльності вводить читача у зміст питань.

Ергономічні принципи розв'язків технічної системи та його художньо-конструкторський витвір побудовані на Європейському стандарті EN 614-1:2006A1:2009(E) *«Безпека обладнання. Ергономічні засади конструювання»*.

Зупинимо увагу на другій половині назви книги: «Проєктування та конструювання приладів». Друга назва у голову ставить питання розробки технічного проєкту з його перевтіленням у процес конструювання, який матеріалізує проєкт виробу у вигляд креслень, схем, специфікацій відповідно до стандартів, об'єм та глибина яких у виробничих умовах забезпечить виготовлення виробу. Тематика під такою назвою є посібником у створенні нових виробів взагалі та приладів зокрема; включає в себе як методологію, так і довідниковий матеріал та практичні рекомендації, які зрозумілі та корисні для сформованих практичним досвідом спеціалістів. Цю тематику важко назвати путівником для студентів, які тільки-но оволодівають азами даної науки. Крім цього, неоднозначним є розуміння первинності дій: проєктування чи конструювання? Проєктування та конструювання переплетені та взаємозв'язані, головна мета обох процедур – створення нового виробу. На сьогодення встановлена точка зору, що проєктування передує конструюванню, його зміст – виявлення потреб суспільства у виробі, пошук ідей та фізичних явищ, які лягатимуть у функціональну структуру, розробка принципової (функціональної) схеми виробу, і аж потім, після перевірки дієздатності схеми, вступають у гру конструктори, які сумісно з проєктантами, методами ітерацій, доводять виріб до промислового втілення.

Отже, під *конструюванням* будемо розуміти розробку конкретного варіанта виробу на основі результатів *проєктування*. Існує й альтернативний підхід – сприйняття процесу конструювання як головного дійства, під яким розуміють матеріальний процес – побудову технічного об'єкта, змішуючи таким чином поняття «конструкція» та «конструювання». Вважаємо, що сформульований системний підхід спростить шлях читачу у формуванні чіткої моделі приладу, а викладений комплекс знань слугуватиме *путівником* не лише у вивченні студентами структури приладів, а й допоможе в роботі проєктантам, конструкторам та експлуатаційникам.

Разом з цим, представлена *рівнева модель* функціональної структури виробу, вимоги до його *зовнішньої структури* у вигляді удосконаленої діаграми Вена, а також подана інформація щодо *внутрішньої структури* ***формулюють комплекс властивостей та вимог***, якими повинен володіти довільний виріб, в тому числі і ***прилад*** у широкому розумінні цього слова.

1. Вступна частина

1.1. Базові поняття

- **Техніка, конструкція**
- **Проєктування, конструювання**
- **Машина**
- **Прилад, апарат**

Техніка. Термін походить з грецької «τεχνε» – мистецтво, майстерність. Зміст цього поняття історично змінювався з розвитком виробництва, його генезис пройшов три етапи. *Перший*. В період виникнення поняття основним його змістом була індивідуальна майстерність окремої людини. Цей зміст побутує і донині: техніка виконання рухів у спорті, танцях, володіння музичними інструментами, інше. *Другий*. В умовах розвитку ремеслового виробництва центр ваги переміщується із галузі індивідуальної майстерності в галузь прийомів, методів, рецептів, які передаються з покоління в покоління, переважно по спадковості. Про це свідчать прізвища родин: Кушнір, Боднар, Столяр. *Третій*. В умовах розвинутого виробництва до поняття "техніка" відносять усі виготовлені матеріальні засоби, які забезпечують життєдіяльність людини, процес виробництва, а отже, існування та розвиток людства взагалі.

Ступінь розвитку та прогрес Т. залежить від ступеня та глибини пізнання людиною законів природи, явищ – це загальнонаукові основи техніки. Іншою стороною в Т. є суспільні потреби: науковий інтерес, енергетика, технологічні та військові потреби, медицина.

Конструкція – продуманий комплекс властивостей, які необхідно надати конкретному виробу для максимального задоволення людських потреб. Указаний комплекс буде визначати характеристики (параметри) виробу.

Отже, конструкція представляє собою абстракцію, яка існує незалежно від матеріального виробу. Інколи ототожнюють абстраговане поняття конструкції і його матеріалізований образ. Так, в [5] знаходимо: "конструкція [лат. constructio] – 1) *будова, пристрій*, взаємне розташування частин якого-небудь предмета, машини, приладу, споруди; 2) *споруда або її частина*, які характеризуються деякою ознакою; *наприклад, залізобетонні, дерев'яні, монолітні, збірні конструкції*.

Проєктування *(відповідно до стандарту):* «розробка проєктної, конструкторської та іншої технічної документації, яка призначена для створення нових видів і зразків продукції промисловості».

У вузькому змісті під проєктуванням розуміють теоретичні процедури, які полягають у формуванні документації за визначеною функціональною ідеєю, що передує процесу створення матеріальних образів технічних систем.

Конструювання – планомірний процес конкретизації штучних структур та впорядкування рішень щодо них відповідно до проєкту. В результаті конструювання проєкт матеріалізується у вигляді креслень, схем та іншої документації, обсяг та якість яких дозволяє здійснити процес виробництва. Походить слово від латинського “construere” – творити що-небудь.

У багатьох випадках поняття *проєктування* та *конструювання* змішують.

Машина [лат. machine: споруда] – пристрій, який використовує механічні рухи для перетворення енергії, матеріалів та інформації з метою заміни або полегшення фізичної та розумової праці.

Класифікація машин

1) машини-генератори – здійснюють перетворення енергії;
   основним параметром є коефіцієнт корисної дії (ККД), який характеризує досконалість перетворення наявної енергії в необхідну;
2) машини-знаряддя (технологічні) – здійснюють дії над матеріалом;
   характеризуються точністю виконання операцій, безвідмовністю дій, ступенем автоматизації, продуктивністю;
3) транспортні машини (наземні, залізничні, водяні, повітряні);
   характеризуються ККД – відношенням корисної маси (тягаря) до повної маси; для авіаційної техніки основні є безвідмовність, високий ККД двигуна, що зумовлює меншу масу бортового запасу палива;
4) обчислювальна та інформаційна техніка, в якій використовуються механічні рухи, в тому числі робототехніка;
   характеризуються пропускною інформаційною спроможністю, швидкодією та точністю виконання дій.

Прилад – технічна система, створена для сприйняття інформації про властивості об’єктів зовнішнього світу та для взаємних перетворень фізичних полів.

Апарат – комплексна технічна система, ядром якої є прилад, а периферія наділена технологічними функціями. Приклади: фотоапарат, рентгенівський тощо.

1.2. Назва, функції, класифікація приладів, їх номенклатура

1.2.1. Назва приладів

Назва та елементна база приладів формуються фізичними положеннями (явищами або ефектами), що лежать в основі роботи приладу. На рис. 1.1 зображена схематична діаграма комбінаційних принципів функціональних перетворень в приладах, побудованих на трьох визначальних фізичних положеннях: механіки та теплотехніки, оптики, електромагнетизму [1, 45, 59]. Зони перекриття окремих положень породжують комбіновані системи, як це показано на схемі.

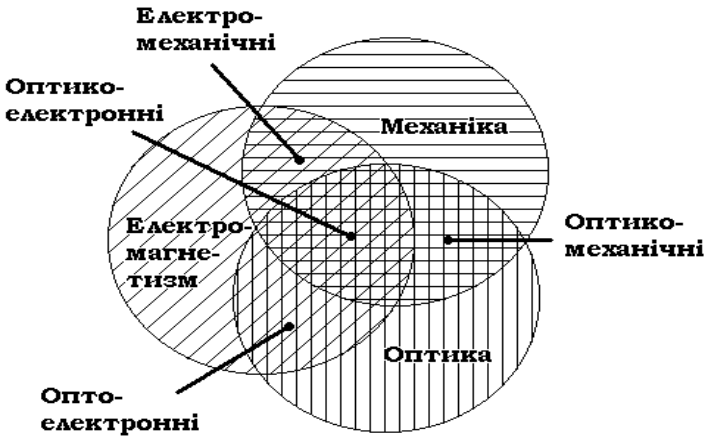


Рис.1.1. Діаграма взаємодії фізичних положень, що лежать в основі функціональних перетворень в приладах

1.2.2. Функції приладів

Застосування приладів будемо називати *функціями* приладів. Розрізняємо два підходи до класифікації.

Класичні (узагальнені) функції приладів

1. *Вимірювальні прилади:* вимірювання параметрів фізичних полів (перетворення інформації);
2. *Прилади-генератори*: перетворення електричної енергії в інші форми (перетворення енергії);
3. *Регулювально-керувальні:* прилади керування та регулювання технологічними процесами, які вивільнюють людину від монотонної праці в процесі виробництва (перетворення матеріалів).

Схематично названі функції представлені структурою, показаною на рис. 1.2.

Соціальні функції

В основі застосувань приладів є соціальні потреби, суть яких така:

1. Задоволення суспільних потреб людства в інформації про зовнішній світ (вічний потяг людини до нових знань);
2. Морська навігація та аеронавігація, військова техніка;
3. Біологія і медицина (охорона здоров'я);
4. Звільнення людини від монотонних дій в процесі виробництва, контроль за ходом технологічних процесів;
5. Забезпечення творчої діяльності людини; розважальний комплекс (радіо, ТБ, музичні центри, інше).



Рис. 1.2. Узагальнені функції приладів

Основні параметри приладів:

1) Функціональні:

- чутливість,
- стабільність,
- точність виконання функцій,
- діапазон вимірювальних величин,
- можливість підключення автоматизованої системи обробки даних.

2) Економічні й експлуатаційні:

мала маса та металоємність, габарити, енергоємність, об'єм та вартість ремонтних робіт, витрати на оплату праці операторів, високий технічний ресурс, простота й безпека обслуговування, зручність в керуванні, складанні та розбиранні.

1.2.3. Класифікація та номенклатура приладів

Як бачимо з рис. 1.1, в основі класифікаційних ознак лежать фізичні принципи, закладені у функцію перетворення сигналу приладів. Їх класичне призначення – вимірювання параметрів фізичного поля, їх взаємні перетворення. Основні параметри поля та їх перетворення демонструються у табл. 1.1.

1.2.3.1. Вимірювальна техніка, номенклатура (примірне)

Геометрична структура об'єктів – лінійні та кутові вимірювання: штангген- та мікрометричні інструменти, міні - та мікрокатори, індикатори стрілочні, оптиметр, мікроскопи, лінійні та просторові компаратори, мікрогеометрія: профілометри-профілографи.

Фізико-механічні вимірювання – час, маса, сила, фізичні константи: хронометри, ваги, динамометри, тензометри, тахеометри, альтиметри, манометри, витратоміри (рідини, газу).

Теплофізичні вимірювання – температура, теплоємність, калориметрія, температурні коефіцієнти розширення, вологість: термометри, калориметри.

Таблиця 1.1

Вимірювальні величини та сигнали параметрів фізичного поля

Вимірювальні величини	Вимірювальні сигнали							
	Геометричне переміщення	**Сила**	**Переміщення носія: рідина, газ, тиск**	**Переміщення світлового та електронного променя**	**Тиск**	**Електричні величини: сила струму, напруга, опір, ємність, індуктивність**	**Часові вимірювання: інтервал часу, частота**	**Імпульсні та цифрові сигнали**
Переміщення: лінійні та кутові	X	X	X	X	X	X	X	X
Маса	X	X	X	–	X	–	–	–
Механічні величини:								
Сила	X	X	X	–	X	X	X	X
Швидкість (лінійна, кутова)	X	X	X	X	X	X	X	X
Прискорення (лінійне, кутове)	X	X	–	–	X	X	X	X
Момент сили	X	X	–	–	X	X	–	–
Момент інерції	X	X	–	–	X	X	–	–
Гідростатичні та гідродинамічні величини:								
Тиск	X	X	X	–	X	X	X	X
Рівень	X	X	X	–	X	X	–	–
Густина	X	X	–	–	X	–	–	–
В’язкість	X	X	–	–	X	–	–	–
Витратоміри	X	X	–	–	X	X	X	X
Вологомісткість	X	X	–	–	–	X	–	–
Термодинамічні величини:								
Температура	X	X	X	–	X	X	–	–
Теплоємність	X	X	X	–	X	X	–	–
Кількість теплоти	X	X	X	–	X	X	–	–
Електричні величини:								
Заряд (струм)	X	X	–	X	–	X	X	X
Напруга	X	X	–	X	–	X	X	X
Опір	–	–	–	X	–	X	X	X
Індуктивність	–	–	–	X	–	X	X	X
Ємність	–	–	–	X	–	X	X	X
Хімічні величини:								
Лужність, кислотність (pH-метри)	–	–	–	X	–	–	–	–
Газовий склад: газоаналізатори, хроматографія	–	–	–	X	–	–	–	–
	–	–	–	X	–	–	–	–
Атомна (ядерна) радіація	–	–	–	–	–	X	X	X
Електромагнітне випромінювання:								
X–промені (рентген)	X	–	–	X	–	X	–	–
Оптичне випромінювання	X	–	–	X	–	X	X	X
Випромінювання радіодіапазону	X	–	–	X	–	X	X	X
Торсійні електромагнітні поля	X	–	–	X	–	X	X	X
Часові вимірювання:								
Інтервал часу, частота, стробоскопи	X	–	–	–	–	X	X	X

Вимірювання фізико-механічних властивостей твердих тіл, рідин і газів – модулі пружності, твердість, внутрішнє тертя, густина, в'язкість, змочування.

Електричні, магнітні, електромагнітні вимірювання – постійні та змінні напруги, струми, активні та реактивні опори: амперметри, вольтметри, омметри, осцилографи, частотоміри, спектроаналізатори, підсилювачі, фазові детектори.

Оптичні вимірювання – сили світла, освітленості, яскравості, оптичних постійних, спектральні, поляризаційні): фотометри, поляриметри, рефрактометри, спектрофотометри, колориметри, гоніометри, інтерферометри.

***Прилади ядерних, хімічних та біологічних досліджень*:** радіоактивність, pH-метри, газоаналізатори, хроматографи, біопотенціометр.

***Прилади для медицини*:** біохімічні дослідження тканин та продуктів життєдіяльності, фізіотерапевтична та профілактична апаратура; апарати штучних органів, хірургічне обладнання, техніка протезування.

***Прилади для техніки зв'язку, грально-розважальні, забезпечення творчої діяльності*:** радіо-, теле-трансляційна та приймальна апаратура, відео, звукозаписувальна та відтворювальна побутова і студійна апаратура, апаратура сотового зв'язку (телефони та телетайпи, радіорелейні лінії, провідники, кабелі, засоби високочастотного зв'язку, координатні з'єднувачі), радіолокаційна та пеленгувальна апаратура, прилади фото-кінотехніки, прилади-тренажери, технічні ігри.

1.2.3.2. Прилади перетворення енергії

Генератори фізичних полів – електричних, магнітних, електромагнітних, акустичних; джерела світлових полів: освітлювальні системи загального та спеціального призначення, лазери, стробоскопи.

1.2.3.3. Технологічні функції приладів (апарати)

Основне завдання технологічних функцій – формування потоку вимірювальної інформації, яка необхідна для неперервного контролю і керування технологічними процесами. Одночасно з названим, застосування технологічних вимірювань актуальне з метою створення моделей технологічних процесів для їх подальшої оптимізації в реальних процесах та реальному часі.

У ході технологічних застосувань приладів виконуються такі завдання:

- Обчислення коефіцієнтів корисної дії нагрівальних систем, насосів, компресорів;
- вимірювання та стабілізація головних параметрів процесів: температури, тиску, загальні витрати та рівень витратних субстанцій, їх кількість та якість;
- комплексний параметричний контроль складу речовини;
- вимірювання фізико-хімічних властивостей рідин та газів;
- вимірювання концентрацій рідин та газів, їх стабілізаційного стану;
- аналіз складу та концентрацій бінарних, багатокомпонентних рідин і газів; газоаналізатори та хроматографи.

1.3. Структура виробу [2, 5, 8, 68]

1.3.1. Поняття структури, її класифікація

Структура (structure від лат. – будова, порядок розташування) ***виробу*** – це його будова, яка визначає як порядок та послідовність взаємодії складових частин (деякої множини), так і зв'язків між ними, які в сукупності виконують функціональні завдання, поставлені перед виробом для задоволення потреб людини.

Розглядаючи цю множину, можливі такі комбінації елементів:

– множина, зібрана без встановлення функціональних зв'язків елементної бази – *макет*;
– множина як неподільний функціональний комплекс геометрично невпорядкованих структур з довільним розташуванням, але з встановленими зв'язками – *модель*;
– множина, зібрана відповідно до наперед продуманого комплексу розташування структур та функціональних зв'язків між ними – *виріб*.

Реалізація названого комплексу у виробничих умовах і сформує виріб.

Сутність формування виробу демонструється на рис. 1.3 [5].

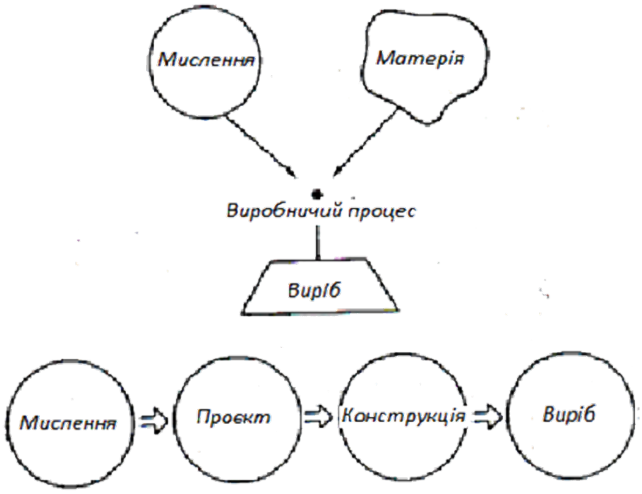


Рис. 1.3. Опис сутності формування виробу

В теорії конструкцій можлива багатозначність станів та зв'язків обмежується функціональними однозначними зв'язками, якими має володіти виріб, що і забезпечить визначений і впорядкований функціональний стан виробу.

Звідси: ***функціональна структура*** – це структурні елементи та зв'язки між ними, які забезпечують роботу окремого виробу відповідно до фізичних положень функціональної ідеї, покладених в основу роботи виробу при його створенні.

Геометрична структура – множина матеріальних об'єктів (структур), побудована згідно з функціональною ідеєю приладу; тобто це порядок та послідовність структурних одиниць.

Розрізняють два рівні геометричної структури: *зовнішня та внутрішня*.

Зовнішня структура – зовнішній вигляд, форма вибору, або зовнішня геометрична структура (ЗГС). Отже, *ЗГС* – це художньо-конструкторський розв'язок приладу, в основу якого покладена діаграма Вена (рис. 7.2) [2].

Переплетення процесу вибору форми з іншими задачами проєктування та конструювання відображається в постановці загальної задачі при її уточненні і розбитті на підзадачі. Процес коригується на кожному наступному кроці конкретизації вигляду майбутнього виробу, особливо під час інтеграції всіх визначальних складових рішень щодо форми в єдине ціле – ***процес суперизації***.

При постановці задачі на розробку виробу замовник переважно формулює конкретний зміст форми у вигляді технічних умов. Перевірка правильності вибору форми є важливим питанням при експлуатаційних випробуваннях та дослідженнях властивостей виробу.

Внутрішня структура – це скомпонована та сполучена функціональними зв'язками елементна база виробу в геометрично обмеженому просторі.

Обмеження простору забезпечується корпусом приладу, який в спеціальних випадках, при особливому фізичному захисті, називають *кожухом*.

Отже, теоретичне приладобудування структуру приладу (апарата) розглядає ***на двох рівнях абстрагування*:**

1-й рівень – принципова, тобто *функціональна структура*;

2-й рівень – будова виробу – *геометрична структура*.

Приклади принципової структури: кінематична схема, оптична схема або їх комбінація, принципова електрична або електронна схема.

1.3.2. Класифікація виробів

Виріб – це результат цілеспрямованого перетворення матерії людиною у деякий предмет для задоволення своїх матеріальних або духовних потреб.

Вироби та їх види

1. *Виробом* називають довільний предмет або набір предметів виробництва, які підлягають виготовленню на підприємстві.
2. Вироби, в залежності від призначення, поділяють на вироби основного виробництва і на вироби допоміжного виробництва.
   До виробів *основного виробництва* належать вироби, призначені для зовнішньої поставки (реалізації).
   До виробів *допоміжного виробництва* відносять вироби, які призначені тільки для власних потреб підприємства, що їх виготовляє.

Приклади: штампувальні матриці, форми для виливання, спеціальний інструмент.

ДСТУ ГОСТ 2.101-68 [4] установлює такі види виробів (табл. 1.2):

а) деталі; б) складальні одиниці; в) комплекси; г) комплекти.

Вироби, в залежності від наявності або відсутності в них складових частин, поділяють на:

а) неспецифіковані (деталі), що не включають складових частин;

б) специфіковані (складальні одиниці, комплекси, комплекти), що складаються із двох або більше складових частин.

Таблиця 1.2

Види виробів: ДСТУ ГОСТ 2.101–68

Види виробів	Визначення
Деталь	Виріб, який виготовлений з однорідного матеріалу за найменуванням та маркою матеріалу, без застосування складальних операцій, наприклад: валик із однорідного шматка металу; вилитий корпус; пластина з біметалевого листа; маховичок із пластмаси (без арматури); відрізок кабелю або дроту. Ці ж вироби з нанесеним покриттям – захисним, декоративним або іншим (дріт в ізоляції), незалежно від виду, товщини і призначення покриття, або виготовлені із застосуванням місцевого зварювання, пайки, склеювання, зшивки тощо; наприклад, хромований гвинт; трубка, запаяна або заварена з одного шмата листового матеріалу; коробка, сформована з суцільного шмата картону.
Складальна одиниця	Виріб, складові частини якого підлягають з'єднанню поміж собою на підприємстві-виробнику складальними операціями (згвинчуванням, спряженню клепкою, заваркою, паянням, розвальцюванням, склеюванням, зшивкою та ін.), наприклад автомобіль, верстат, телефонний апарат, мікромодуль, редуктор, зварний корпус, маховичок із пластмаси з металаевою арматурою.
Комплекс	Два або більше специфікованих вироби, не об'єднані на підприємстві-виробнику складальними операціями, але які призначені для виконання взаємозв'язаних експлуатаційних функцій. Кожне із складових специфікованих виробів, які включені в комплекс, виконують одну або кілька основних функцій, притаманних усьому комплексу, наприклад: автоматична телефонна станція, бурильна установка; комплексом є конструкція, що включає в ракету, пускову установку і засоби керування; корабель. До комплексу, крім виробів, які виконують основну функцію, можуть включатися деталі, складальні одиниці, комплекти, призначені для виконання допоміжних функцій; наприклад складальні одиниці та деталі, які призначені для монтажу комплексу на місці його експлуатації; комплекс запасних частин, пакувальних засобів, тари.
Комплект	Два або більше виробів, які не сполучені на підприємстві-виробнику складальними операціями і являють собою набір виробів, які мають спільне експлуатаційне призначення допоміжного характеру, наприклад комплект запасних частин, комплект інструментів і приладдя, комплект вимірювальної апаратури, комплект пакувальної тари тощо. До комплекту також відносять складальну одиницю або деталь, які постачаються разом з набором інших складальних одиниць і (або) деталей, наприклад: осцилограф в пакувальному ящику, змінні частини до нього, запасні частини, приєднувальні кабелі.

Вузол – складальна одиниця, яка може збиратися окремо від інших складових частин виробу або виробу в цілому (на іншому заводі) і виконувати визначену функцію у виробах одного призначення тільки сумісно з іншими складовими частинами (ДСТУ ГОСТ 23887-79).

Модуль – складальна одиниця, яку можна визначити як окремий конструктивний елемент за функціональною ознакою, розміром або матеріалом. *М.* переважно виконує самостійну окрему функцію.

Приклади: окрема плата як елемент заміни, об'єктив, окуляр, карбюратор.

Агрегат – сукупність складальних одиниць, які сумісно виконують завершену функцію.

Приклад. Посівний агрегат включає: культиватор + сівалка + борони + котки.

1.3.3. Застосування технічного виробу

Під застосуванням технічного виробу необхідно розуміти діяльність людини з використанням цього засобу відповідно до призначення, направлену на отримання корисного ефекту від його використання або ж при його спогляданні з різних мотивацій. Використання приладу перетворює його потенціальну (внутрішню) функцію в деякий очікуваний матеріальний ефект, який розуміємо як *необхідну* умову його застосування. *Достатньою* умовою буде інтелектуальний ефект, що забезпечує науково-технічний прогрес від застосування.

Виріб має відповідати трьом критеріям:
доцільності, відповідності та ефективності [2].

Критерій доцільності. Доцільність виготовлення з наступним застосуванням виробу визначається двома факторами: 1) ефективністю виконання цим виробом науково-технічних завдань; 2) терміном його використання (служби). Цей термін визначає тривалість фізичної та моральної придатності приладу. Ефективність та тривалість використання залежать від науково-технічних чинників з одного боку, а з іншого – від ергономічних та естетичних, що проявляються як навантаження на людину зовнішніми діями в процесі експлуатації як безпосередньо технічного засобу, так і супутніх факторів, які виявляються сенсорними акцепторами людини.

Критерії відповідності. З точки зору споживача виріб (прилад) може вважатися хорошим тоді і тільки тоді, коли він відповідає своєму призначенню, а його застосування найбільше відповідає внутрішній функції відповідно до потреб споживача. Критерії відповідності виробу подано у табл. 1.3 [2].

Таблиця 1.3

Критерії відповідності виробу своєму призначенню

Критерії	Характеристика	Оцінка
Функціональна відповідність	Виріб забезпечує результат застосування відповідно до призначення	Відповідає
Кількісна відповідність	Виріб побудований відповідно до вимог проєктного рівня	Плановий рівень параметрів і характеристик
Якісна відповідність	Зовнішня геометрична структура відповідає функціональній структурі; Виріб виглядає врівноважено, з гармонійним формами та елементами	Зовнішня гармонійна відповідність

Критерієм ефективності застосування є оцінка виробу.

Розрізняють *ціннісну* та *естетичну* оцінку.

Ціннісна оцінка. Споживач оцінює не тільки результат застосування виробу, як корисні матеріальний і нематеріальний ефекти, але й саме застосування, тобто виробляється ціннісна оцінка. Ця оцінка залежить від очікуваних і фактичних результатів застосування, а також від очікуваного та фактичного корисних ефектів.

Найчастіше вона являє собою комплексну оцінку виробу у формі: *«придатне», «непридатне» або «незрозуміле». Отже*, мова йде не про виріб як деяку «річ у собі» (звертаємо увагу на заголовний рисунок), а про задоволення життєвих потреб людини за допомогою відповідного виробу.

Естетична оцінка. Особливу роль при оцінці виробу відіграє її естетична грань – естетична оцінка. Естетичною називають ту якість відношень між людиною (суб'єктом) і виробом (об'єктом), результат яких заснований на розумовому (мисленому) сприйнятті виробу. Ця якість виходить за межі значення самого об'єкта і визначає позицію людини щодо об’єкта: *симпатію, антипатію* чи *байдужість*, *задоволення* чи *огиду*, що сприймаються одночасно «як розумом, так і серцем». Відповідність названим вище критеріям оцінюється поняттям **«досконалість»**. Досконалість в приладобудуванні має однакову вагу для всіх приладів, на противагу виробам машинобудування (важкого), до яких можуть пред'являтися абсолютно різні (але відносно рівнозначні) вимоги. Наприклад, може бути виділена зона для збору брухту, в яку заборонений доступ людей, і навпаки. Якщо прийняти до уваги роздільну здатність органів чуття, особливо органів зору, і завдяки малим відстаням між приладом і оператором, досконалість багато в чому схожа якості обробки зовнішньої поверхні. Свідомо чи інтуїтивно споживач очікує від технічно високоякісного виробу, особливо споживчого товару, високої якості обробки його поверхні. Це стосується й виробів, які тривалий час знаходяться поруч із користувачем, як-от настільні лампи й інше. Навіть найдрібніші недоліки виконання можуть знецінити виріб в естетичному плані, знижуючи цим самим попит на нього.

1.4. Етапи та стадії створення нових технічних систем (ТС)

Створення нових технічних виробів здійснюється на підставі:

1) наукових відкриттів нових фізичних явищ;
2) необхідності або потреб створення технічних систем нових якостей;
3) виявлення нових фізичних станів та властивостей об’єктів.

Сучасний системний підхід до створення нових технічних об’єктів конструкцій зводиться до таких етапів:

I) *проєктування*; II*) конструювання*;

III) *виробництво*; IV) *випробування*.

Схематичне зображення послідовності проведення робіт при створенні виробів нової техніки демонструє рис. 1.4.

Обов’язковість виконання стадій і етапів розробки конструкторської документації встановлена замовником відповідно до поставленого технічного завдання на розробку.

Стадії розробки конструкторських документів (КД) та етапів виконання робіт наведені у табл.1.4 [12].

Таблиця 1.4

Стадії розробки ПКД та етапи виконання робіт: ДСТУ ГОСТ 2.103–68

Стадії розробки	Етапи виконання робіт
І. Технічна пропозиція (ТП) Виконується проєктно-конструкторською організацією при отриманні від замовника технічного завдання (ТЗ) на виріб.	**Технічна пропозиція** – сукупність конструкторських документів, які мають містити технічні і техніко-економічні обґрунтування доцільності розробки документації на виріб на підставі аналізу технічного завдання замовника і різних варіантів можливих рішень виробу, порівняльної оцінки рішень з врахуванням конструктивних і експлуатаційних особливостей виробу, що розробляється, і існуючих виробів і патентних досліджень. Склад робіт: 1) підбір науково-технічного матеріалу, патентний пошук; 2) розробка технічної пропозиції з присвоєнням документам літери **"П";** 3) Розгляд і затвердження технічної пропозиції. Технічна пропозиція після узгодження та утвердження в установленому порядку є підставою для розробки ескізного (технічного) проєкту.
ІІ. Ескізний проєкт "Е"	**Ескізний проєкт** – сукупність конструкторських документів, які мають містити принципові конструктивні рішення, які дають загальне уявлення про будову і принцип роботи виробу, а також дані, що визначають призначення основних параметрів і габаритних розмірів виробу, що розробляється. Склад робіт: 1) розробка ескізного проєкту з присвоєнням документам літери **"Е"**; 2) виготовлення і випробування макетів (при потребі); 3) розгляд і затвердження ескізного проєкту. Ескізний проєкт після узгодження та утвердження в установленому порядку є підставою для розробки технічного проєкту або робочої конструкторської документації.
ІІІ. Технічний проєкт "Т"	**Технічний проєкт** – сукупність конструкторських документів, які містять завершальне технічне рішення. Склад робіт: 1) розробка технічного проєкту з присвоєнням документам літери **"Т";** 2) виготовлення і випробування макетів (при необхідності). Технічний проєкт після узгодження і утвердження в установленому порядку є підставою для розробки робочої конструкторської документації.
ІV. Робоча конструкторська документація: а) дослідного зразка (дослідної партії) виробу, який призначений для серійного (масового) або одиничного виробництва (окрім разового виготовлення) б) серійного (масового) виробництва	Розробка конструкторської документації, яка призначена для виготовлення і випробування дослідного зразка (дослідної партії) без присвоєння літери. Виготовлення і попереднє випробування дослідного зразка (дослідної партії). Коректування конструкторської документації по результатам виготовлення і попередніх випробувань дослідного зразка (дослідної партії) з присвоєнням документам літери **"О"**. Приймальні випробування дослідного зразка (дослідної партії). Коректування конструкторської документації за результатами приймальних випробувань дослідного зразка (дослідної партії) з присвоєнням документам літери**"$О_1$"**. Для виробів, що розробляються на замовлення Міністерства оборони, при необхідності – повторне виготовлення і випробування дослідного зразка (дослідної партії) за документами з літерою**"$О_1$"** і коректування конструкторських документів з присвоєнням їм літери **"$О_2$"**. Виготовлення та випробування установочної серії за документами з літерою **"$О_1$"** (або **"$О_2$"**). Коректування конструкторської документації за результатами виготовлення і випробування установочної серії, а також оснащення технологічного процесу виготовлення виробу, з присвоєнням конструкторським документам літери **"А"**. Для виробів, що розробляються на замовлення Міністерства оборони, при необхідності – виготовлення і випробування головної (контрольної) серії за документами з літерою **"А"** і відповідне коректування документів з присвоєнням їм літери **"Б"**.

В команду проєктантів в обов'язковому порядку включають дизайнера, зміст роботи якого та очікувані результати подані в табл.1.5 [54].

1.4.1. Етап проєктування

Розбивається на чотири стадії.

Перша стадія включає:

- обґрунтування та аналіз потреби у створенні нового технічного об'єкта;
- проведення наукових досліджень функціональних ідей об'єкта.

Друга стадія:

- вибір, обґрунтування та кінцеві доробки функціональної ідеї, вибір технічного принципу її реалізації;
- розрахунки принципової схеми, розробка структурної схеми.

Третя стадія:

- дослідження конструктивних вимог до виробу, які випливають із компоновки елементної бази та застосування матеріалів виготовлення, пов'язаних з пріоритетами виробництва;
- дослідження технологій виготовлення та умов реалізації, виходячи з наявної виробничої бази, або ж пошуку у виробничій сфері зовнішніх запозичень чи нових можливостей;
- економічні питання, пов'язані з експлуатаційними показниками виробу, з економічною ефективністю його застосування, а далі – з вартістю виготовлення.

На *четвертій стадії* етапу проєктування досліджуються показники функцій зовнішньої структури виробу (технічна, ергономічна, естетична, захист):

- функціонально-експлуатаційні, які включають питання порядку та зручності роботи з ТС, зручності ремонту та обслуговування;
- психофізіологічні, що передбачають впливи, які виявляє виріб в процесі його експлуатації на органи почуття, центральну нервову систему та м'язово-рухомий апарат людини;
- питання екологічної безпеки, які диктуються оточуючим середовищем і конкретними умовами, в яких виріб може бути використаним;
- естетичні показники, які формують ставлення користувача до виробу та його конкурентна спроможність на ринку;
- захисні функції, які виявлять ступінь дії негативних зовнішніх фізичних дій на функціональну стійкість виробу, що закладено в програму випробувань останнього.

На етапі *проєктування* остаточно формується узгоджене із замовником *технічне завдання* (ТЗ) та *технічні умови* (ТУ) на об'єкт розробки. ТЗ має включати всі дані, які необхідні для конструкторської розробки виробу. При цьому також формуються узгоджені основні параметри об'єкта, наприклад, ККД, ене-

ргоємність, матеріалоємність, точність виконання функцій. Але у ТЗ не повинно бути вказівки на конкретну конструкцію, що обмежить творчість конструктора і пошук поліпшених варіантів.

Таблиця 1.5

Художнє конструювання в проєктуванні промислових виробів

Стадії проєктування	**Зміст роботи дизайнера**	**Результат роботи дизайнера**
Технічне завдання Попередня: художньо-конструкторський аналіз	Участь в розробці технічного завдання; Участь у дослідженні аналогів в комплексі зв'язків «людина–предмет» і «людина–середовище»	Технічне завдання, узгоджене з дизайнером. Узагальнення художньо-конструкторського аналізу
Перша: технічна пропозиція: *ескізний проєкт*	Розробка художньо-конструкторської пропозиції: Попередні дослідження на основі даних соціології, ергономіки та інших наук; Вивчення конструкції, матеріалів і технології виготовлення; Визначення вимог, які накладаються на виріб, що розробляється; Розробка варіантів компоновок, їх аналіз і пропозиція до вибору	Художньо-конструкторська пропозиція; 2-3 ескізних варіанти компоновки у графіці та об'ємі; обґрунтоване рішення.
Друга: Технічна пропозиція: *технічний проєкт* (лише для складних виробів)	Розробка художньо-конструкторського проєкту; завершальна компоновка, моделювання або макетування; Рішення складних поверхонь; Вибір лицювальних матеріалів; Економічні обґрунтування; Оформлення проєкту	Художньо-конструкторський проєкт: Модель або макет; Компонувальні креслення; Перспективні зображення; Замовлення на матеріали; Пояснювальна записка;
Третя: *Робочий проєкт*	Робоче проєктування: Розробка робочих креслень виробу, технологічної оснастки, плазмових креслень; Контроль, що забезпечує відповідність робочих креслень художньо-конструкторського проєкту; Розробка креслень елементів пром. графіки, деталей зовнішнього оформлення виробів, щитків та пультів керування	Робочий проєкт; Креслення загальних виглядів; Затвердження технічної документації
Дослідний зразок	Участь у авторському нагляді за виготовленням, випробуванням і доведенням дослідного зразка	

1.4.2. Етап конструювання

На підставі технічного проєкту конструкторська організація формулює технічну пропозицію (ТП) – сукупність конструкторських документів, які міс-

тять технічні та техніко-економічні обґрунтування доцільності розробки документації на виріб та окремих варіантів можливих розв'язків виробу. ТП розробляється лише в тому випадку, коли повні вимоги не вказуються в ТЗ з причини необхідності попередньої конструкторської проробки, аналізу, виявлення різних варіантів виробу. Глибина цієї проробки мусить забезпечити порівняльну оцінку варіантів, що розробляються.

Отже, на етапі конструювання здійснюється розробка конструкторської документації, об'єм, обсяг та якість якої дозволяє виготовити об'єкт з дотриманням вимог технології в конкретних виробничих умовах.

Етап конструювання розбивається на три стадії:

1) ескізний проєкт; 2) технічний проєкт;

3) розробка робочої конструкторської документації.

Ескізний проєкт (літера "Е") – сукупність конструкторських документів, які містять принципові схемні та конструкторські розв'язки ідеї об'єкта, що дають *загальне уявлення* про будову, принцип роботи, а також дані, які визначають призначення, основні параметри й габаритні розміри виробу.

Технічний проєкт (літера "Т") – сукупність конструкторських документів, які містять кінцеві технічні розв'язки, що дають *повне уявлення* про будову та конструкцію виробу, що розробляється. Згідно з "Т" забезпечується можливість оцінки відповідності виробу вимогам технічного завдання, технологічності, ступеня складності виготовлення, способів пакування, транспортування та монтажу на місці експлуатації. На стадії "Т" виявляють необхідність нового (спеціалізованого) обладнання із наступною зовнішньою закупкою або виготовлення в разі відсутності стандартного обладнання та здійснюється розробка метрологічного забезпечення параметрів та характеристик як об'єкта в цілому, так і елементної бази зокрема. При цьому відбувається вибір методів та засобів вимірювання.

Робоча конструкторська документація **("РКД")**. Завершальна стадія конструювання, впродовж якої проводиться розробка конструкторських документів, якість та об'єм яких достатні для виготовлення дослідного зразка або дослідної партії виробу. За результатами виготовлення та подальшого випробування проводиться корекція конструкторської документації. В деяких випадках здійснюється розробка "РКД" для виготовлення макетів із метою:

- перевірки принципів роботи виробу або (і) складових частин на стадії технічного проєкту;
- перевірка основних конструкторських рішень виробу в цілому або складових частинна стадії технічного проєкту;
- попередньої перевірки доцільності зміни окремих частин виробу, що підлягає виготовленню, до внесення цих змін в робочі КД дослідного зразка (дослідної партії).

1.5. Конструкторські документи

До конструкторських документів (надалі – документ) відносять графічні і текстові документи, які окремо або в сукупності визначають склад і будову

виробу і містять необхідні дані для його розробки або виготовлення, контролю, приймання, експлуатації й ремонту. Види документів указані в табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Основні види конструкторських документів; ДСТУ ГОСТ 2.102-68

Вид документа	**Код документа**	**Визначення**
Креслення деталі	—	Документ, який містить зображення деталі та інші дані, необхідні для її виготовлення і контролю.
Складальне креслення	СК (складальне креслення)	Документ, який містить зображення складальної одиниці та інші дані, необхідні для її збирання (виготовлення) і контролю. До складальних креслень відносять також креслення, за якими виконують гідромонтаж і пневмомонтаж.
Креслення загального вигляду	ЗВ (загальний вигляд)	Документ, який визначає конструкцію виробу, взаємодію його основних складових частин і пояснює принцип роботи виробу.
Теоретичне креслення	ТК (теоретичне креслення)	Документ, який визначає геометричну форму (обводи) виробу і координати розташування складових частин.
Габаритне креслення	ГК (габаритне креслення)	Документ, який містить контурне (спрощене) зображення виробу з габаритними, установочними і приєднувальними розмірами.
Електромонтажне креслення	ЕМ (електро-монтажне креслення)	Документ, який містить дані, необхідні для виконання електричного монтажу виробу.
Монтажне креслення	КМ (монтажне креслення)	Документ, який містить контурне (спрощене) зображення виробу, а також дані, необхідні для його установки (монтажу) на місці застосування. До монтажних креслень відносять також креслення фундаментів, які спеціально проєктуються для установки виробу.
Специфікація	—	Документ, який визначає склад складальної одиниці, комплексу або комплекту.
Пояснювальна записка	—	Документ, який містить опис пристрою і принципу дії виробу, що розробляється, а також обґрунтування технічних і техніко-економічних рішень, які закладені в розробку.
Технічні умови	ТУ (технічні умови)	Документ, який містить вимоги, (сукупність всіх показників, норм, правил і положень) до виробу, його виготовлення, контролю, приймання і поставки, які недоцільно указувати в інших конструкторських документах.

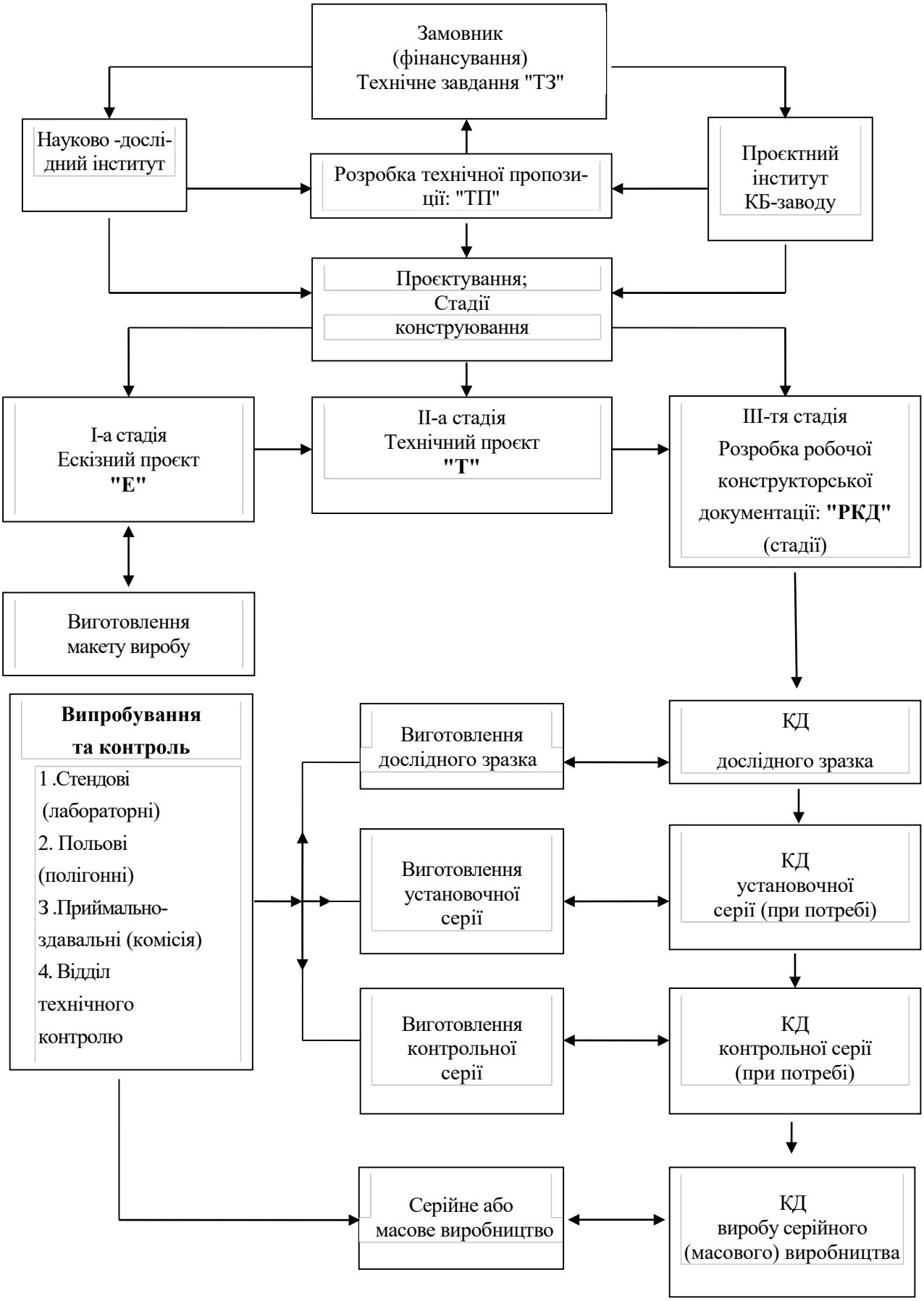


Рис.1.4. Структурна схема розробки, виробництва та випробування виробів нової техніки

Примітки (до табл. 1.4 та до рис.1.4)

1. Стадія «Технічна пропозиція» не поширюється на конструкторську документацію виробів, що розробляються на замовлення Міністерства оборони.
2. Необхідність розробки документації для виготовлення і випробування макетів установлюється розробником.
3. Конструкторська документація для виготовлення макетів розробляється з метою: перевірки принципів роботи виробу і його складових частин на стадії ескізного проєкту; перевірки основних конструкторських рішень виробу, що розробляється, або його складових частин на стадії технічного проєкту; попередньої перевірки доцільності зміни окремих частин виробу, що виготовляється, до внесення цих змін в робочі конструкторські документи дослідного зразка (дослідної партії).
4. Під разовим виготовленням розуміють одночасне виготовлення одного або більше екземплярів виробу, подальше виробництво якого не передбачається.

1.6. Навчальний процес

Основний замисел навчально-методичної літератури з конструювання – це навчання активного, раціонального конструювання.

Активно конструювати означає [68]:

– не сліпо копіювати існуючі зразки, а конструювати осмислено, вибираючи із всього наявного сучасного арсеналу конструктивних рішень найбільш доцільні варіанти в даних умовах;

– уміти поєднувати різні розв'язки і знаходити нові, покращені варіанти, тобто конструювати з творчою ініціативою, винахідницьким вогником;

– неперервне поліпшувати показники машин і приладів та направляти розвиток галузі з урахуванням технічного прогресу;

– враховувати динаміку розвитку промисловості і створювати живучі, гнучкі, багаті резервами машини і прилади, які здатні задовольняти зростаючі вимоги як особистості, так і народного господарства в цілому, і які застраховані на тривалий термін від морального старіння.

Результат роботи конструктора – це запис конструкції у вигляді текстових та графічних документів як матеріалізований образ виробу.

Принципи та правила запису конструкції регламентуються *стандартами*, серед яких *головне* місце займають ***стандарти ЕСКД –***

"Єдина система конструкторської документації " [4]**.**

2. Функціональна структура приладу

2.1. Рівнева модель функціональної структури

Пропонуємо функціональну структуру приладів (апаратів) розглядати у вигляді ***рівневої моделі*** [7, 8], зображеної на рис. 2.1.

Отже, ця модель включає шість рівнів, чотири – основні, які забезпечують функціональні властивості виробу, інші два – рівні забезпечення та захисту.

Первинне збурення фізичного поля x_0 надходить на вхід датчика фізичної величини, де це збурення перетворюється у форму представницької величини x, яка підлягає подальшим перетворенням.

Послідовно будується ланцюжок перетворень (рівні I – IV), які і складають функціональну сутність приладу (апарата).

Окрім рівнів перетворення, модель включає в себе ще два рівні (V –VI), які забезпечують та підтримують роботу приладу.

Допоміжний рівень *К* – це окрема елементна база *К*, що забезпечує функції комунікацій, об'єднана поняттям «комуніканти» [59].

2.2. Перший рівень функціональної структури: датчик фізичної величини [8, 11, 12, 13, 18, 20]

Інформація – це означення змісту, отриманого із зовнішнього світу в процесі нашого пристосування до нього й пристосування до нього наших почуттів.

Норберт Вінер, «батько» кібернетики

2.2.1. Поняття сигналу та інформації

Термін "інформація" походить від латинського слова "informatio", що означає відомості, роз'яснення, виклад.

1. У побуті інформацією називають будь-які *дані або відомості*, які кого-небудь цікавлять, або події про види діяльності (інше). "Інформувати" у цьому змісті означає "повідомити щось, невідоме раніше".
2. Клод Шеннон, американський вчений, що заклав основи теорії інформації – науки, що вивчає процеси, пов'язані з передачею, прийомом, перетворенням і зберіганням інформації, розглядає інформацію *як зняття невизначеності з наших знань про щось*.
3. У кібернетиці під інформацією розуміють *ту частину знань*, що використовується для орієнтування, активної дії, керування, з *метою збереження, удосконалювання, розвитку системи* (Норберт Вінер). .
4. У техніці зв'язку під інформацією розуміють *повідомлення*, передані у формі *знаків або сигналів*.

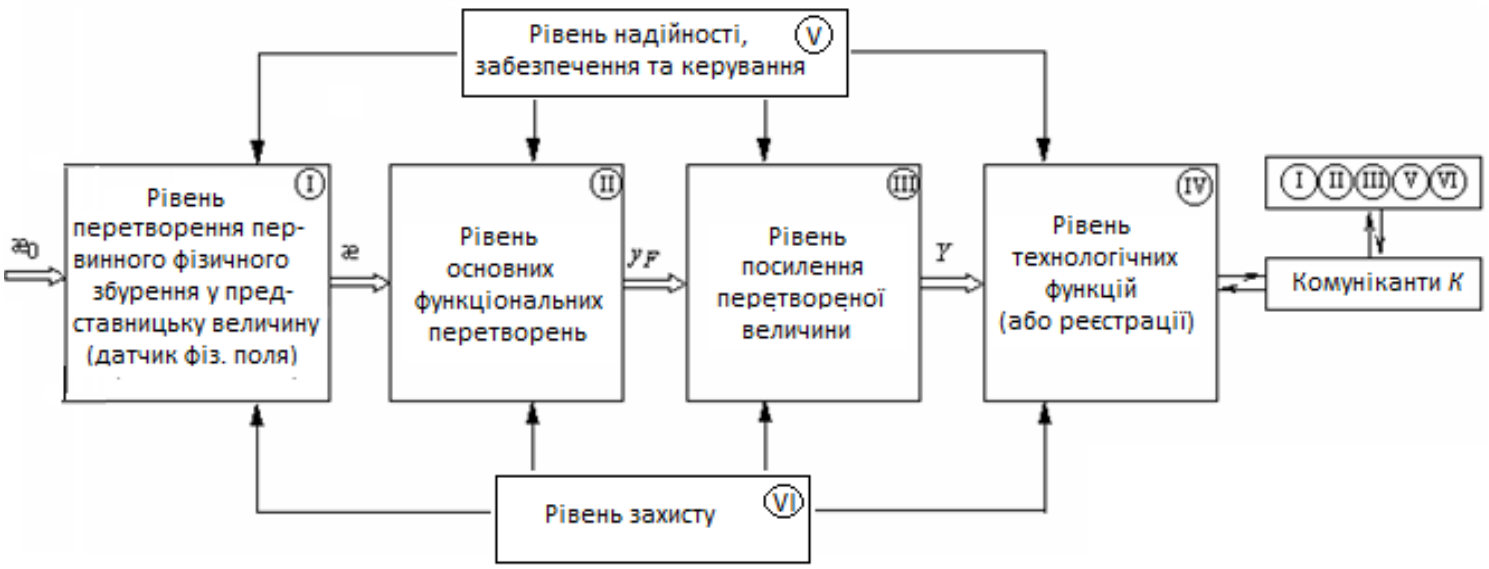


Рисунок 2.1. Рівнева модель функціональної структури приладів і апаратів

I – рівень перетворення первинного фізичного збурення x_0 у представницьку величину x (датчик фізичної величини);

II – рівень основних функціональних перетворень, y_F – функція перетворення сигналу;

III – рівень посилення перетвореної величини, Y;

IV – рівень технологічних функцій (властивий апаратам);

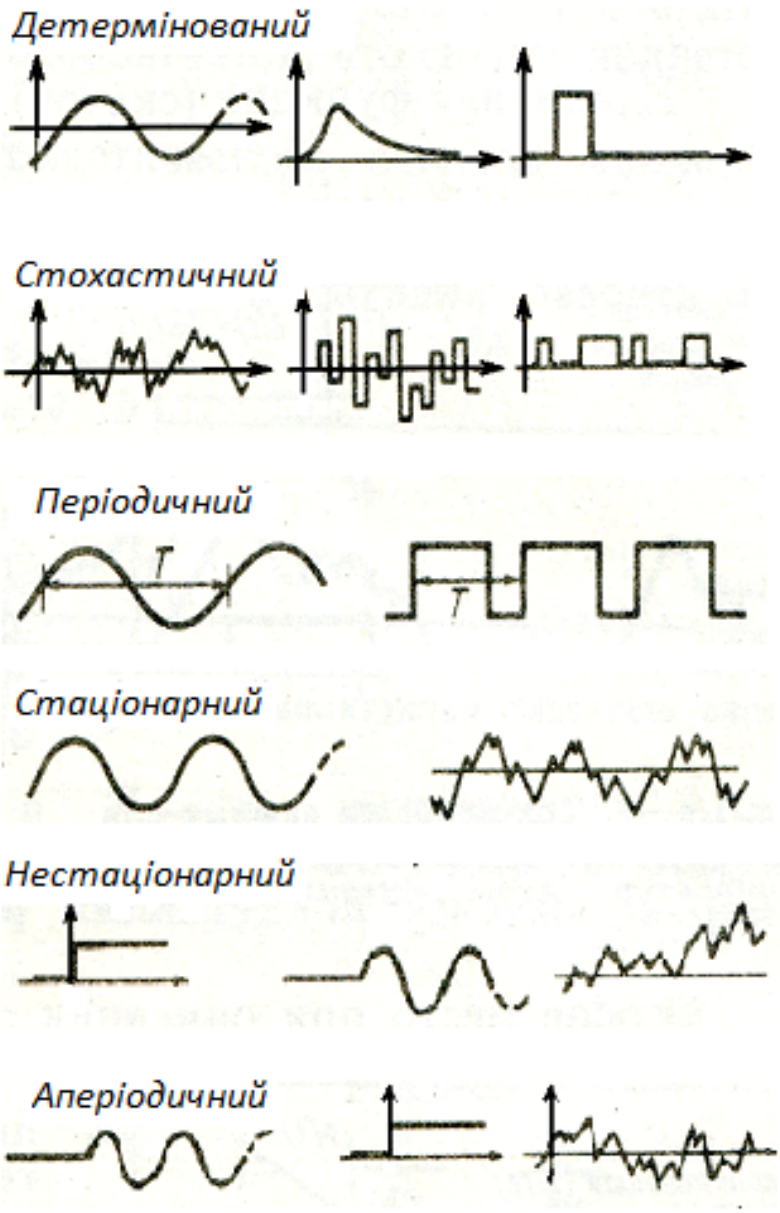
V – рівень надійності, забезпечення (та керування);

VI – рівень захисту;

К – комуніканти; зовнішні зв’язки; внутрішні зв'язки поміж окремими рівнями.

Означення сигналів [11, 12, 13]**.** Основною функцією вимірювальних приладів є перетворення вхідної інформації у вихідну, яка володіє властивостями сприйняття як людиною, так і технічною системою. Конструктору необхідне технічне тлумачення поняття інформації, тобто формування матеріального виразу цього поняття та його математичне описання.

В загальному, поняття «інформація» представляє категорію теорії пізнання, яка стосується лише людини. Але на сьогодення інформація також слугує кібернетичним системам, які приймають рішення щодо виконання дій без прямої участі людини. Носієм інформації є матеріальна субстанція у вигляді фізичного поля, параметри якого змінюються як в часі, так і просторі; в такому разі вони мають математичне представлення. Зміст інформації в повідомленні описується параметром фізичного поля *P* (табл. 2.1).



Сигнал. Якщо інформація закодована за певним законом, то вона сприймається як сигнал – *S*.

Отже, сигнал (*лат.* signum) – умовний знак, фізичний процес або явище, які несуть повідомлення про деяку подію, стан.об’єкта, режим його роботи.

На рис. 2.2–2.7 наведені найбільш важливі математичні види сигналів [11] та їх графічна форма.

Основні види, носії, інформаційні параметри сигналів, а також їх ознаки наведені в табл. 2.1 [1].

Рис.2.2 – 2.7. Види сигналів та їх графічний вигляд

Таблиця 2.1

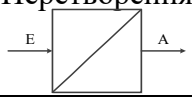
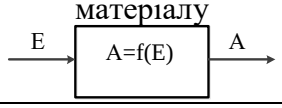
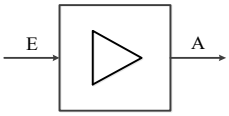
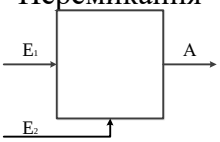
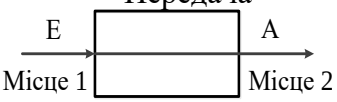
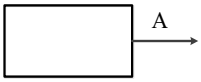
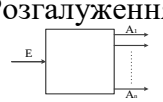
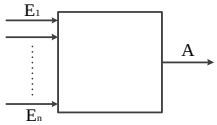
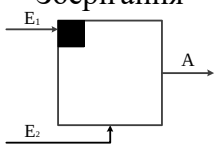
Характеристичне представлення сигналів та їх ознаки

Сигнал	**Основні носії сигналу та інформаційний параметр Р**	**Вид сигналу**
Загальне математичне представлення сигналу – просторово-часове: $\boldsymbol{S = s(x, y, z, t).}$ Ця форма характерна для запису та від творення відеоінформації; Часовий: $\boldsymbol{S = s(t).}$ Така форма використовується переважно для передачі сигналів: - неперервне; - дискретно. Просторовий: $\boldsymbol{S = s(x, y, z).}$ Така форма використовується переважно для зберігання інформації; Одновимірний: $\boldsymbol{S = s(x);}$ Двовимірний: $\boldsymbol{S = s(x, y);}$ Тривимірний: $\boldsymbol{S = s(x, y, z).}$	*Геометричні:* лінійні $x. y, z$та кутові α, β, γ координати, відстань поміж двома точками *l*, площа *A*, об'єм *V*; *Механічні:* швидкість *v*, прискорення *a*, сила *F*, маса *m*, тиск *p*, робота *A*; *Теплові*: температура ϑ(°C), кількість теплоти *Q*, та теплоємність *c*, теплотворна здатність *ΔQ*; *Гідравлічні, пневматичні, вакуумні:* тиск *p*, перепад тисків *Δ p*, витрати рідин та газів; *Акустичні:* сила звуку *I*, поріг чутності p_0, рівень звукового тиску *L*, висота звуку, тембр звуку; *Електричний сигнал:* струм *I* (заряд *q*), напруга *U*, опір *R*, ємність *C*, діелектрична проникливість *ε*; *Магнітні:* індуктивність *L*, напруженість магнітного поля *H*, магнітний потік *B*, магнітна проникливість *μ*; *Оптичні:* коефіцієнт заломлення *n*, сила світла *I*, яскравість *B*, довжина хвилі *λ*, координати кольору *{XYZ};* *Хімічний сигнал:* показник *pH*-, склад та концентрація газу; *Ядерно-фізичний:* концентрація заряджених частинок, густина потоку нейтронів	1. Аналоговий: може набувати довільне значення в математично означених межах; 1.1. Аналоговий неперервний – може змінюватись в довільний момент часу; 1.2. Аналоговий дискретний – змінюється у відлікові моменти часу. 2. Цифровий: 2.1. Бінарний *P* може набувати тільки два відлікових значення; 2.2. Багатоточковий– може набувати декілька знаків умовного алфавіту (азбука Морзе).

У приладах виконуються найрізноманітніші функції перетворень; за міжнародною класифікацією отримали спеціальні умовні позначення (табл. 2.2) [2].

Таблиця 2.2

Основні функції, характер перетворень приладами та їх позначення

Основні функції, позначення перетворень	**Характер перетворень**	**Приклади перетворень**
Перетворення 	Зміна матеріального (енергетичного) носія вхідного сигналу; (Е і А фізично різні)	Електроакустичний (гучномовець, мікрофон); електромагнітний (фотодіод, світлодіод); термоелемент; п'єзоелектричний
Перетворення стану, матеріалу 	Зміна рівня або стану сигналу в часі A = f(E); (Е і А фізично однакові)	Механічна передача, цифро-аналоговий та аналого-цифровий перетворювачі, пристрій кодування, модулятор
Зміна 	Зміна величини сигналу V; (A = VE): V > 1 – посилення; V <1 – ослаблення, демпфування	Електронний (селективний, диференціальний, операційний), магнітний (трансформатор), важіль, зубчастий редуктор, пневматичний, гідравлічний
Перемикання 	Переривання і (або) відновлення потоку сигналів $E_1 \rightarrow A$ за допомогою додаткової величини E_2;	Механічний вимикач, електронний вимикач (тиристор), електромеханічний вимикач (реле), замикаюча ланка (механічний затвор, напівпровідниковий діод)
Передача 	Передача сигналу від входу до виходу	Електричний провід, кабель, карданна передача, вал, трубопровід, шланг, канал, лінза, призма, світловод
Генерація фізичних полів 	Генерування (підготовка) сигналів (Е відсутнє)	Генератор сигналів довільної фізичної природи, форми та тривалості
Фільтрація 	Вибір (селекція) частини з безлічі сигналів відповідно до певних критеріїв	Смуговий фільтр, фільтри високих і низьких частот, механічний фільтр (камертон), оптичний фільтр (поляризаційний та ін..)
Розгалуження 	Розгалуження одного сигналу на декілька $A_1,\ldots,A_n$, при цьому $A_1 = (A_2, \ldots, A_n)$	Розгалуження електричних дротів, редуктор
Об'єднання 	Математичне об'єднання двох або більше сигналів $(E_1, \ldots, E_n)$	Логічні схеми для додавання, віднімання, зміщення, множення, ділення та ін..
	Логічне об'єднання двох або більше сигналів $(E_1, \ldots, E_n)$	Логічні схеми І, АБО, НІ та ін..
Зберігання 	Прийом деякої кількості сигналів і видача їх незмінними через жорстко заданий або довільний проміжок часу (за викликом E_2)	Електронне запам'ятовування (флеш-пам’ять електронна променева трубка з пам'яттю), фотографія класична та цифрова, голограма, перфокарта

Класифікація сигналів (за рис. 2.2 – 2.7).

Детермінований сигнал (рис. 2.2) в довільну мить математично визначений однозначно і технічно відтворюваний. Завдяки математичній формі його опису можна передбачати зміни параметрів сигналу в часі та просторі. Використовується для перетворення та передачі інформації в цифровій та в аналоговій формах.

Стохастичний сигнал (рис. 2.3) в кожний окремий момент змінюється випадково, але таким способом, що може бути описаний методами математичної статистики. Такий опис не дає можливість передбачати конкретні зміни у формі сигналу; ці сигнали мають спеціальні застосування.

Періодичний сигнал (рис. 2.4) описуються рівністю $s(t+T)=s(t)$, де T – його період.

Випадковий сигнал може мати довільний вигляд у довільний момент часу – як стаціонарний (рис. 2.5), так і нестаціонарний (рис. 2.6) або ж аперіодичний (рис. 2.7). Для передачі інформації обширно ці сигнали не застосовуються; їх використовують для разових повідомлень.

2.2.2. Перетворення фізичного поля у представницьку величину

[11, 12, 13, 18, 39]

Традиційна функція приладів — перетворення первинного фізичного поля або його збурення в форму, яка доступна для сприйняття людиною як інформація про об'єкти зовнішнього світу. В процесі експлуатації для одержання інформації вимірювальний прилад вступає *у взаємодію* з оточенням, суть якого – зовнішнє середовище, технічний об'єкт, людина. В загальному випадку можливе збурення фізичного поля – зміна фізичного стану оточення в часі або просторі. Виявлення такої зміни здійснюється системою, яку називають *датчиком* (*д.*) фізичної величини. Переважно датчик незалежний від приладу і винесений за його межі. Якщо на вхід датчика надходить фізичне поле або його збурення, то на його виході формується так звана *представницька величина*. Найбільш сприйнятлива форма представницької величини – *електрична* як така, яку сучасна техніка здатна добре обробляти, перетворювати, зберігати. Перетворення неелектричних величин в електричні може здійснюватися двома способами.

1. Активні перетворення – такі, які формують представницьку величину без використання зовнішньої енергії, в результаті чого датчиком виробляються власні електричні величини: напруга, струм, заряд.

Приклади

1) П'єзокристали у вигляді пластин формують на своїх гранях електричні заряди при пружній механічній деформації цих пластин. Кількість зарядів буде залежати від величини сили, що спричинила вказану деформацію;

2) Фотодіод при включенні у гальванічному режимі.

2. Пасивні перетворення – формування представницької величини потребує зовнішньої енергії:

а) на основі безпосередніх застосувань залежності фізичних закономірностей від вимірюваних величин, таких як опір, провідність, магнітна і діелектрична проникність, індуктивність, напруга, величина зарядів;

б) шляхом механічних впливів: ці дії дозволяють змінювати такі величини, як опір, індуктивність, ємність та ін.;

в) методом компенсації: таким способом можна вимірювати силу струму; компенсація здійснюється вручну або автоматично. Неелектричні фізичні величини можна також перетворювати в інші форми, не лише електричні.

Приклади: 1) фотодіод у фотодіодному режимі; датчики руху.

Отже, представницька величина, яка сформована датчиком фізичного поля, відображає вхідну фізичну величину E, що вимірюється, у вигляді вторинної (вихідної) величини A на виході датчика; ця вторинна величина надалі підлягає спостереженню або подальшій обробці.

Первинна вимірювана величина в загальному випадку змінюється в часі (або просторі). Її сприймають чутливі елементи засобу вимірювання і перетворюють в електричну, гідравлічну або пневматичну величину на основі фізичного закону, який однозначно визначає зв'язок між вхідною та представницькою величинами. Зазначене перетворення може бути багатоступінчасте. Наприклад, механічна сила, діючи на пружину, деформує її; деформація пружини перетворюється тензометром у зміну опору, який надалі за допомогою мостової схеми перетворюється в зміну напруги або сили струму. Зазвичай ця величина ще непридатна для видачі вимірювальної інформації – відліку показань або реєстрації. Переважно перетворена величина потребує підсилення, і лише після цього вона приводиться до стану, придатного до видачі або подальшої обробки. Функціональну залежність поміж фізичною величиною, що надходить на вхід чутливого елемента, і реакцією на його виході, називають ***характеристикою перетворення*** датчика фізичної величини (рис.2.8).

На разі, якщо вхідна величина незмінна за час спостереження або змінюється незначно, то мова йде про *статичну* характеристику, яка може описуватись: 1) деяким рівнянням $A = f(E)$; 2) числовими *табличними* величинами; 3) у *графічній* формі (термопари).

Розрізняють такі види статичних характеристик: 1) лінійні, 2) варіативні, 3) нелінійні. Чутливий елемент, статична характеристика якого являє собою пряму лінію, називають ***лінійним*** чутливим елементом (рис. 2.8 *а*).

В загальному випадку для лінійних елементів математична залежність між вихідною величиною A і вхідною величиною E описується рівнянням:

$$A = \mathrm{E}_{\mathrm{пр}} + k\,E, \qquad (2.1)$$

де $E_{пр}$– поріг реагування; постійний множник k називають коефіцієнтом передачі, чутливістю або крутизною характеристики чутливого елемента.

Апріорі вважається, що для переважної більшості чутливих елементів $E_{пр} = 0$, тобто вихідний сигнал A пропорційний вхідному сигналу E, а рівняння (2.1) має вигляд $A = k\,E$. Однак фактично для формування реакції датчика на фізичне поле має бути деякий поріг реагування, необхідний для подолання сил протидії

чутливого елемента зовнішнім проявам фізичного поля, який підлягає вимірюванню. Звідси випливає, що справедлива наявність деякого постійного коефіцієнта, який у формулі (2.1) представлений величиною $E_{пр}$; ця величина відзначена на кривих рис. 2.8. Отже, *поріг чутливості* – це мінімальне значення вхідної величини $E_{пр}$, при якій спостерігається відгук датчика $A_{пр}$ (рис. 2.8 *а*).

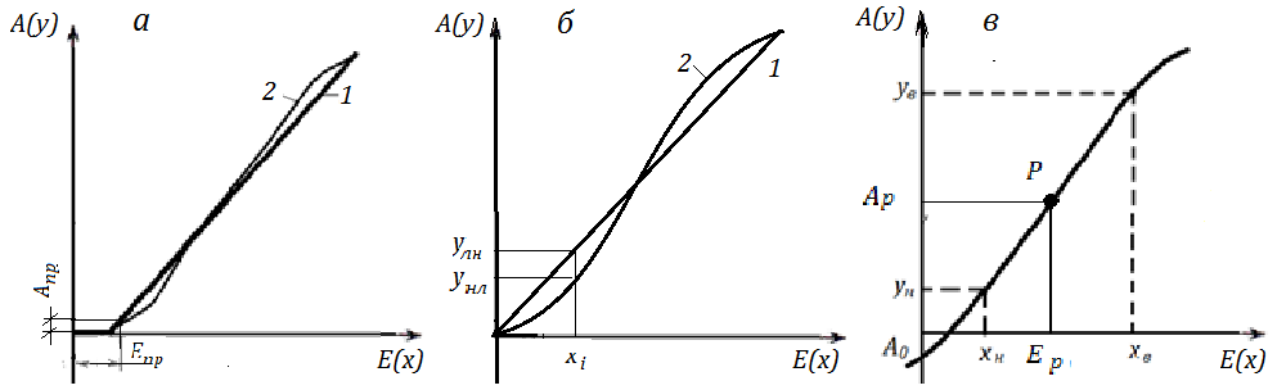


Рис. 2.8. Статичні характеристики перетворення фізичної величини:

а – статистична характеристика з нечутливістю у нульовій точці: $E_{пр}$ – поріг чутливості та $A_{пр}$ – поріг спрацьовування; 1 – номінальна лінійна залежність; 2 – варіація;
б – квазілінійна у визначених межах;
в – визначення нелінійності чутливим елементом (рис. 2.8 *а*).

У переважній більшості вимірювальних задач використовуються лінійні чутливі елементи, оскільки саме лінійність спрощує та підвищує точність вимірювань і обробки сигналів. Але внаслідок фізичних і технічних причин статична характеристика варіює вздовж лінійного ходу залежності, як це показано на рис. 2.8 *а*, крива 2. Нелінійність ξ можна оцінювати кількісно, як показано на рис. 2.8 *б* . При відповідному x_i знаходять найбільшу різницю відхилення лінійної (1) та нелінійної (2) кривих, як це показано на рисунку.

Тоді

$$\xi = \frac{|y_{лн} - y_{нл}|_{max}}{y_{лн}}. \qquad (2.2)$$

Одначе існують задачі, для розв'язання яких необхідні функціональні залежності реакцій чутливих елементів від вхідної величини – квадратичні, логарифмічні та інше [11–17]. Якщо характеристики відрізняються від лінійних, то такий чутливий елемент називають ***нелінійним***. Цьому елементу в різних точках діапазону вимірювання (рис. 2.8 *в*) властива різна чутливість, тобто різна крутизна статичної характеристики S, значення якої в точці P визначається залежністю

$$S_p = \left(\frac{dA}{dE}\right)_{E_p}. \qquad (2.3)$$

У принципі, всі перетворювачі, а особливо нелінійні, потребують вказівки нижнього та верхнього діапазонів вимірювальної величини, як показано на рис. 2.8 *в*.

Нижні межі, крім нульових, можуть мати від'ємні значення як по вхідних, так і вихідних величинах (див. рис.2.8).

Гістерезис чутливого елемента – явище, що проявляється розбіжностями у ході функціональних залежностей, отриманих при зростанні вимірюваної величини (права гілка) та при її спаданні (ліва гілка) (рис. 2.9, *а, б)*.

Залежності, що показані на рис. 2.9, *а,* – це відомий матеріалознавству механічний гістерезис, природа якого – так зване внутрішнє тертя частинок у твердому тілі, наприклад, у пружині. Внутрішнє тертя в матеріалі пружини веде до того, що після зняття навантаження спостерігається залишкова деформація, величина якої залежить від прикладеного навантаження. Ще один приклад механічного гістерезису – пружна післядія. Якщо деякий рухомий пружний елемент знаходиться тривалий час у відхиленому стані, то він не повертається повністю в свій вихідний стан після зняття навантаження. Залишкова різниця$f(E_0)$ залежить як від величини відхилення, так і від тривалості дії сили. Отже, поняття «гістерезис» потребує додаткових пояснень щодо умов прояву.

Діаграма на рис. 2.9, *б* властива феромагнітним матеріалам із так званою передісторією – наявністю залишкового намагнічування (внутрішня петля).

Для приладів із гістерезисними елементами можливе таке явище, як *дрейф*: це самовільна зміна вихідного сигналу при постійному значенні фізичної величини *E(x)*, що надходить на вхід чутливого елемента.

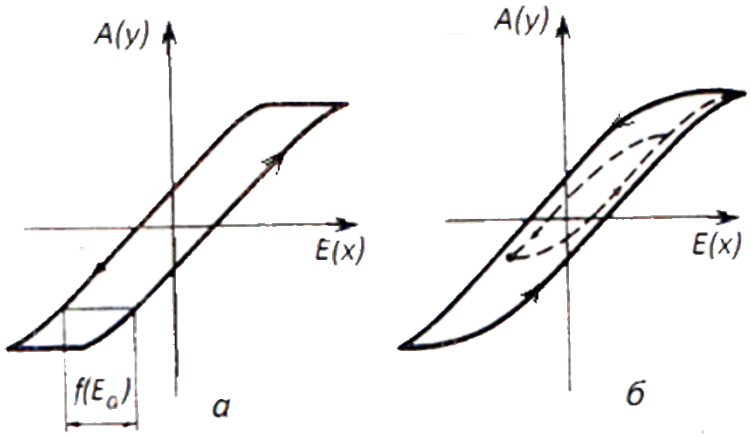


Рис. 2.9. Гістерезисна характеристика датчика:
а – механічний гістерезис (внутрішнє тертя у твердому тілі);
б – крива намагнічування феромагнетиків (з передісторією)

Очікувана *теоретична* залежність між величиною, що надходить на вхід чутливого елемента, і величиною, що видається ним на виході, називається *номінальною* характеристикою. Назвемо величину, що надходить на вхід датчика, *істинною* (фактично істинною буде величина, яка генерується об'єктом дослідження). *Дійсна* характеристика, яка встановлюється в процесі вимірювань, тією чи іншою мірою відрізняється від номінальної.

Похибки одержання представницької величини.

Необхідно розрізняти *природу* похибок, *характер прояву* та їх *оцінку*.

До природи похибок відносимо *теоретичні, технологічні*, похибки *експлуатації* та похибки *зчитування*. Ці питання будуть розглянуті окремо в розділі «Точність роботи приладів».

Характер прояву – *систематичні та випадкові*. Оцінка – *абсолютні та відносні*. Коротко означимо ці питання [11, 39].

До *систематичних* віднесемо такі, яким притаманний причинно-наслідковий фактор, насамперед зумовлений природою похибок. Цей фактор можна оконтурити так званими *впливовими величинами*, які можна виявити в кожному випадку застосування технічної системи та умов її застосування. Часто спостерігають незворотні зміни властивостей чутливого елемента, що також зумовлює виникнення систематичних похибок вимірювання. Такі зміни можуть бути викликані, наприклад, структурними змінами чутливого елемента, термічним або механічним перевантаженням, а також хімічними перетвореннями. Це необхідно враховувати при виборі виду чутливого елемента, особливо високочутливого. В окремих випадках доцільно вдаватися до іншого методу вимірювання, що забезпечує кращу відтворюваність результатів.

Систематичні причини викликаються впливом різних фізико-технічних причин, мають бути виключені на стадії проєктування конструктивними засобами шляхом встановлення регуляторів або компенсаторів.

Випадкові причини виникають як результат випадкових комбінацій багатьох окремих впливів стохастичної природи. Крім цього, можливі так звані грубі промахи людського фактору або ж разові зовнішні впливи природного чи техногенного характеру (напр., вплив на електронну систему електрозварювання).

Оцінка похибок: абсолютна та відносна. *Абсолютну* похибку знаходять за різницею дійсної і номінальної характеристик чутливого елемента. *Абсолютну* похибку чутливих елементів, що володіють нелінійними властивостями у межах вимірювання, називають похибкою нелінійності – відхиленням від лінійності (ф-ла (2.3)). *Відносна* похибка прив’язується до абсолютного значення вимірювальної величини, визначається як відношення абсолютної похибки до номіналу.

Розглянуті похибки охоплюють лише статичні характеристики вимірювальних перетворювачів. При мінливих фізичних величинах з’являються динамічні передавальні функції, для визначення яких має бути відома передавальна функція перетворювача – характер зміни його вихідного сигналу в часі при відповідних змінах вимірюваної фізичної величини.

Вичерпний аналіз цих питань здійснюється у літературі з метрології, наприклад, [13].

До прикладу, на результати тензорезисторного вимірювача сили, чутливого до коливань температури, впливає також вологість навколишнього середовища.

Ретроспективно, засоби перетворення інформації появилися на базі механічних пристроїв, розвиток яких розпочався ще з стародавніх часів. Надалі, з розвитком науки, арсенал перетворень поповнюється оптичними, електричними, електронними, оптоелектронними та оптико-електронними системи. Доля механічних систем стрімко знизилася внаслідок низької продуктивності їх виготовлення, високої вартості, значних матеріальних та енергетичних витрат.

Тенденцією прогресу приладобудування є інтегральні технології [15, 16], комплексне та масштабне використання комп’ютерних систем обробки та зберігання інформації [20]. Щодо виконавчих органів, наявність яких характерна

для апаратів і систем керування технологічними процесами, то переважне використання набули гідравлічні, пневматичні та вакуумні принципи виконання кінцевих функцій.

2.2.3. Перетворення механічних величин

[9, 27, 28, 29]

До механічних величин належать лінійне та кутове переміщення, лінійна та кутова швидкості, лінійне та кутове прискорення, сила та момент сили, момент інерцій, а також похідні від названих величини.

Чутливі елементи з механічним перетвореннями. Систематизація механічних систем породило поняття *«елементарні механізми перетворення руху»,* які можна згрупувати за ознаками та характером перетворень (табл. 2.3).

Складні механізми будуються поєднанням елементарних. Основний принцип утворення складних механізмів вперше був сформульований Володимиром Асуром (рос. механік, 1914 р.) [70], згідно з яким складні механізми будуються шляхом послідовного нашарування кінематичних ланцюгів; при паралельному сполученні утворюються диференційні механізми.

Таблиця 2.3

Класифікація механізмів, характер перетворення руху

Найменування	**Вхідна величина**	**Вихідна величина**
Кривошипні	Обертовий рух; поступальний рух; обертовий рух	Поступальний рух, обертовий рух, гойдальний рух
Важільні	Лінійні переміщення	Лінійні переміщення
Гвинтові	Обертовий рух	Поступальний рух
Тригонометричні	Обертовий рух	Функціональний: поступальний рух
Зубчасті	Обертовий або поступальний рухи; Кут повороту, кількість обертів	Обертовий рух; поступальний рух; Кут повороту, кількість обертів
Кулачкові	Обертовий рух	Функціональні: поступальний або гойдальний рухи
Мальтійські (стрибкові)	Обертовий рух	Обертовий перервний
Фрикційні	Обертовий рух	Обертовий, поступальний рухи
Перетворення виду механічних величин		
Кривошипний Важіль I і II роду Зубчасті механізми Гвинтові механізми Пружини: плоска, гвинтова, спіральна	Сила, момент сили Переміщення, сила Обертовий момент, сила. Обертовий момент Деформація (лінійне або кутове переміщення)	Момент сили, сила Переміщення, сила Сила, обертовий момент; Сила, момент сили

Рис. 2.10. Кристал кварцу:
електрична (x-x), механічна (y-y), оптична (z-z) осі кристалу

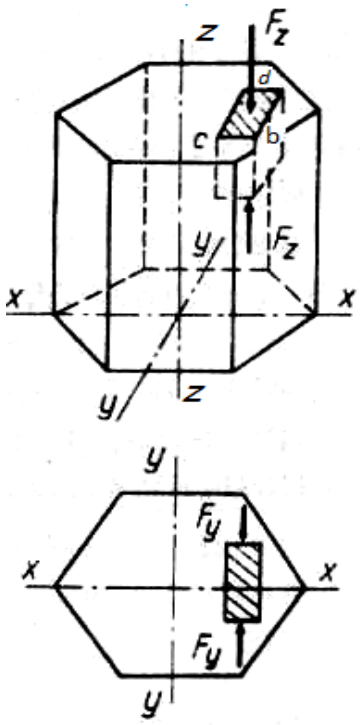


Рис. 2.10. Кристал кварцу: електрична (x-x), механічна (y-y), оптична (z-z) осі кристалу

Важливим механізмом, який використовується для побудови складних, є *кулісний*, який самостійного перетворення руху не виконує.

У спеціальних випадках доцільно комбінувати електричний (електронний) перетворювач з механічним перетворювачем масштабу або виду величин. Так, зусилля і видовження можуть визначатися за їх впливом на частоту механічного вібратора – струнний тензометр і струнний вимірювач тиску. На цьому ж принципі засновано вимірювання густини газів – камертонний вимірювач густини, частота коливань якого в кінцевому випадку вимірюється електричним чином. Наведемо ще приклади: 1) для вимірювань температур використовують чутливий елемент, що перетворює температуру в переміщення деякого елемента внаслідок температурного видовження; це переміщення вимірюється електричним чином; 2) температуро чутливі біметалеві і манометричні елементи як з механічним виходом, так і з електричним (представницькі величини).

2.2.4. Вимірювання механічних величин (сила, деформація, переміщення) з генерацією електричних величин [6, 19]

2.2.4.1.П'єзоелектричні чутливі елементи Відносять до класу *активних* чутливих елементів. Принцип дії п'єзоелектричних елементів заснований на використанні властивостей деяких кристалів утворювати на своїх гранях електростатичні заряди під дією зовнішніх пружних деформацій. Цими властивостями володіють такі кристали: кварц, турмалін, калійно-натрієва сіль винної кислоти (сегнетова сіль), титанат барію, інше.

П'єзочутливі елементи дозволяють контролювати швидкоплинні процеси, оскільки заряди утворюються практично миттєво, безінерційно. На практиці з названих матеріалів віддають перевагу кварцу завдяки низькій температурній чутливості та великому модулю пружності (модуль Юнга $E = 8 \times 10^{10} H/m^2$), що дозволяє здійснювати вимірювання мізерно малих переміщень.

Кристали кварцу є шестигранними призмами (рис. 2.10). Поздовжня *z-z* − так звана оптична вісь; вісь *x-x*, що проходить через ребра призми – електрична вісь, і нейтральна *y-y* – механічна вісь, що проходить через середини протилежних граней. Вирізаний з кварцового кристала прямокутний паралелепіпед (пластина) з товщиною d, грані якого (b, c) перпендикулярні відповідно осям *x-x і y-y* , як це показано на рисунку, володіє п'єзоелектричними властивостями.

Сила, спрямована вздовж осі z-z паралелепіпеда, не збуджує електричних зарядів на його гранях. Але під дією зусилля, що розтягує або стискує пластину *вздовж електричної осі x-x*, на перпендикулярних цій осі гранях виникають

заряди різного знаку – це так званий *поздовжній* ефект. Величина цих зарядів дорівнює $Q_x = dF_x$, де Q_x – заряд; d – постійний коефіцієнт (п'єзомодуль); F_x – сила, що діє на поверхню кристала вздовж осі *x*. Як випливає з наведеного рівняння, величина заряду Q_x не залежить від розмірів кристала кварцу.

Поперечний ефект – навантаження, що діють у напрямку механічної осі кристала F_y, викликають виникнення заряду:

$$Q_y = d\frac{l_y}{l_x}F_y, \tag{2.4}$$

де l_x та l_y – розміри кристала в напрямках осей x і y. Як бачимо, при поперечному ефекті Q_y залежить від розмірів кристала. Умови міцності не дозволяють отримати великі заряди за рахунок збільшення l_y і зниження l_x, тому на практиці використовують переважно поздовжній п'єзоефект. При температурах вище 500°С п'єзоефект зникає. Температура 537° С, при якій структура кварцу переходить в структуру, яка не володіє п'єзоелектричним ефектом, називається ***точкою Кюрі.***

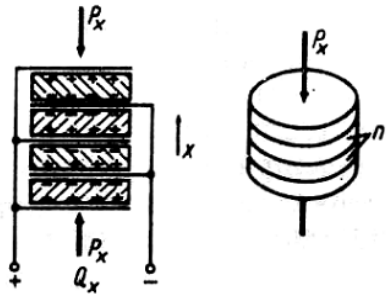


Рис. 2.1.1. Конструкція тензометричного композиційного датчика з поздовжнім п'єзоефектом

Для поліпшення умов вимірювання електричних зарядів, що виникають на відповідних гранях кварцової пластини, останні покривають металевим шаром, утворюючи конденсатор. Для підсилення поздовжнього п'єзоефекту використовують принцип багатошарового конденсатора, як це показано на рис. 2.11.

Оскільки $Q = CU$, то напруга на кристалі

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{dF}{C_0 + C_S}. \tag{2.5}$$

У формулі (2.5) C_0 – ємність кварцу, а C_S – ємність проводів і підключених пристроїв (неминуча). Зазвичай ємність C_S перевищує ємність п'єзокристалу C_0, що різко знижує корисний ефект. Тому C_0 штучно збільшують паралельним з'єднанням декількох пластин; вибір їх кількості дозволяє змінювати діапазон вимірювання. Величина C_S враховує і ємність кабелю підключення, тому проводи приєднання постачаються виробником датчика, а числове значення їх ємності враховують при паспортизації та калібруванні приладу в цілому. Оскільки кожен вимірювач напруги володіє скінченним значенням вхідного опору R_i, то збуджені на гранях кристала заряд і відповідно напруга спадають за експоненціальним законом:

$$U_0 = U_e\, exp\left(-\frac{t}{R_t(C_0 + C_S)}\right), \tag{2.6}$$

тут $R_t(C_0 + C_S)$ – постійна часу, Т.

Отже, при завершенні часу t до значення T, напруга U зменшується в 1 / e разів, тобто приблизно до 37% початкового значення U. Ця обставина обмежує використання п'єзокристалічних датчиків для контролю короткочасних і швидкоплинних процесів.

П'єзоелементи володіють інверсією «входу-виходу»: при прикладенні зовнішніх пружних деформацій виникають електричні заряди (потенціал) на поверхнях кристалічної пластини і навпаки: при прикладенні потенціалу спостерігається пружна деформація п'єзочутливого елемента.

Характеристики п'єзоперетворювачів

Вхідна величина: деформація (сила, момент сили).
Вихідна величина: заряд (потенціал).
Діапазон вимірювань: від 2×10^{-5}Па.
Похибка: $\pm(1-3)\%$ *верхнього значення діапазону вимірювань.*
Динамічна характеристика: верхня границя частот не встановлена.

Переваги: 1) широкий діапазон робочих температур; 2) широкий діапазон вимірювань; 3) висока чутливість; 4) інверсія «входу-виходу».
Недоліки: 1) потреба у дуже високому опорі ізоляції; 2) непридатність до статичних вимірювань.

2.2.4.2. Магніточутливі елементи: елементи Холла і магніторезистори

При розміщенні струмопровідного твердого тіла (пластини) товщиною s в магнітне поле, носії зарядів, що утворюють при своєму русі протічний електричний струм, відхиляються полем в напрямку, перпендикулярному напрямкам струму і магнітного поля. В результаті зсуву зарядів в тілі утворюється поперечно спрямоване електричне поле і на бічних подовжніх сторонах (рис. 2.12) виникає різниця потенціалів – е. р. с. Холла U_H, що визначається виразом:

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{s}, \qquad (2.7)$$

де I – сила струму; B – магнітна індукція; s – товщина пластини; R_H – коефіцієнт Холла.

На рис. 2.13 наведена характеристика датчика положення. Положення нульового значення напруги Холла відтворюється з точністю 0,01 мм.

Відповідне профілювання поля дозволяє отримати лінійну залежність.

Важлива сфера застосування елементів Холла – вимірювання положень рухомих деталей без механічного контакту з ними з видачою напруги, амплітуда якого не залежить від швидкості руху. За допомогою зонда з елементом Холла, розташованого в магнітному полі, можна перетворити кутове переміщення в напругу. Елементи Холла дозволяють здійснювати кодований вимір переміщень, наприклад, за допомогою намагніченого за деяким кодом феромагнітного диска, що обертається, опитуваного поруч з елементом Холла. Подібний пристрій зазвичай виконується як датчик повороту, що кодує диск.

Описаний вище ефект відхилення електронів магнітним полем призводить до зростання омічного опору і використовується в так званих магніторезисторах.

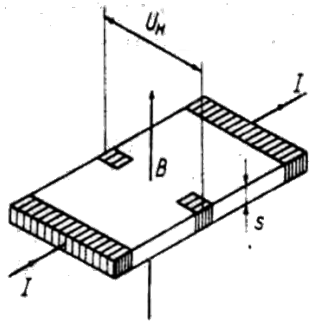


Рис. 2.12. Ефект Холла: визначальні чинники фізичних величин та товщина

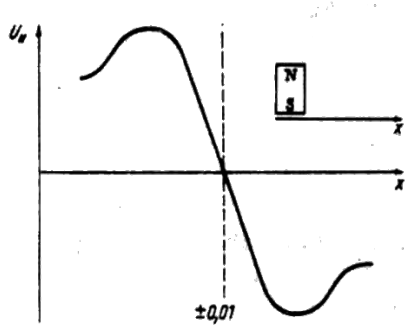


Рис. 2.13. Характеристика датчика положення з перетворювачем Холла

Останні є омічними опорами, які чутливі до магнітного поля, причому при змінах індукції, яка складає 1 В·с/м^2, омічний опір збільшується більш ніж в 20 разів. Магніторезистори можна використовувати не тільки для вимірювання індуктивності магнітних полів, але й подібно зондам Холла, в якості кінцевих вимикачів, безконтактних перетворювачів переміщень.

2.2.4.3. Тензорезистори

Використовуються для вимірювань силових характеристик, включно з деформаціями та переміщеннями. При розтягуванні або стисканні провідника змінюються його довжина, площа перетину і питомий опір, тобто з трьох величин, що визначають значення опору за законом Ома, жодна не залишається постійною. Зазначені зміни залежать від напрямку прикладання сили і в межах пружності пропорційні їй. У ненавантаженому стані опір R провідника з начальною довжиною l_0, визначається його поперечним перетином A_0 і питомим опором ρ

$$R = \rho l_0 / A_0. \qquad (2.8)$$

При розтягуванні провідника його довжина дорівнює $l_0 = l_0 (1 + \Delta l/l_0)$, а перетин $A = A_0 (1\text{-}2\mu\, \Delta l/l_0)$, де μ – коефіцієнт Пуассона, що визначає частку від ділення відносного поперечного звуження перетину до відносного розтягу $\Delta l/l_0$ тіла, яке підлягає дії зусилля розтягу (для більшості металів μ = 0,3).

Змінюється також і питомий опір. Якщо позначити відносну зміну питомого опору $\Delta\rho/\rho$ через τ, а зміну відносного розтягу $\Delta l/l_0$ через ε, то опір розтягнутої дроту визначатиметься залежністю

$$R' = \frac{l_0(1+\varepsilon)\rho(1+\tau)}{A(1-2\mu\varepsilon)}. \qquad (2.9)$$

Уводячи в це рівняння значення опору R_0 нерозтягнутої дротини, знаходимо спрощену формулу для визначення R' з великим ступенем наближення:

$$R' = R(1+\varepsilon)(1+\tau)(1+2\mu\varepsilon).$$

Здійснивши перетворення та нехтуючи членами вищих ступенів малості, одержимо:

$$R' = R(1+\varepsilon+2\mu\varepsilon+\tau),$$

Звідки відносна зміна опору дорівнюватиме:

$$r = (R' - R)/R = \varepsilon + \tau + 2\mu\varepsilon.$$

Величину k, що дорівнює відношенню відносної зміни опору r до відносної зміни розтягу ε, тобто $k = r/\varepsilon$, називають крутизною чутливості тензочутливого елемента:

$$k = r/\varepsilon = 1 + 2\mu + \tau/\varepsilon. \qquad (2.10)$$

При використанні дроту з такого матеріалу, як *константан,* коефіцієнт *k* з причини особливостей механічних та електричних властивостей, дорівнює 2. Цей сплав найкраще підходить для виготовлення тензорезисторів: температурний коефіцієнт опору цього сплаву малий, а його температурний коефіцієнт видовження мало відрізняється від матеріалу дослідження (переважно на основі заліза).

Для забезпечення достатніх для вимірювання змін опору чутливий елемент виготовляють з тонкого проводу, який наклеюється у вигляді петель з паралельними нитками на підкладку з просоченого штучними смолами паперу, як це показано на рис. 2.14. Чутливий елемент виготовляють також способом фотохімічного травлення покритої тонким шаром металу ізоляційної пластинки, переважно паперу, просоченого полімерними смолами. Такі тензорезистори називають фольговими, на противагу дротяним. Останнім часом для виготовлення тензочутливих елементів стали застосовувати напівпровідникові матеріали, в яких при навантаженні поряд зі зміною геометричних розмірів значно змінюється питомий опір, унаслідок чого тензочутливість *k* досягає 180 і більше.

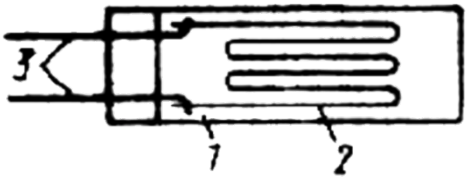


Рис. 2.14. Дротяний тензометр (тензорезистор):
1 – підкладка (папір);
2 – тензочутливий провід;
3 – приєднувальні дроти

Наведена конструкція дротяного тензорезистора має широке застосування. Діаметр дроту складає 20–30 мкм, що забезпечує великий опір та достатню еластичність; ці обставини дозволяють дроту слідувати за деформацією матеріалу випробування. Конструкція тензометра на основі фольги мало відрізняється від наведеної.

На рис. 2.15 показані подовжній і поперечний розрізи тензорезистора, а також способи його закріплення. Як підкладку використовують папір з полімерним покриттям, в якому, як бачимо, втоплені приєднувальні проводи та тензомірний дріт.

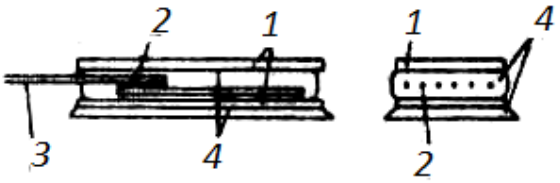


Рис. 2.15. Поздовжній та поперечні розрізи тензометра:
1 – підкладка;
2 – тензочутливий провід;
3 – приєднувальні проводи;
4 – клеюча смола (полімерна)

Дослідження механічних напружень зазвичай проводять в межах пружності матеріалу, тому зміни в опорах дуже малі, максимальне видовження ледве сягає

0,001. При $k = 2$ опір тензочутливого елемента зростає не більше ніж на 1/500 свого первинного значення. Незважаючи на цей недолік, тензорезистори дозволяють досить просто і з великою точністю вимірювати відносні зміни лінійних розмірів за умови врахування впливу можливих завад, перелік яких зазначають в інструкціях з експлуатації тензометрів.

Характеристики тензорезисторів

Вхідна величина: переміщення.
Вихідна величина: зміна опору.
Діапазон виміру: 5 мкм (механічний розтяг або стиск пружного елементу).
Похибка нелінійності: 0,05%.
Частотний діапазон: 0-10 ГГц.

Переваги: незначна похибка, універсальність застосування, невисока вартість, вібростійкість.
Недоліки: низька чутливість, потреба у великих навантаженнях, чутливість до змін вологості і температури, потреба ретельного приклеювання.

2.2.5. Перетворення електричних величин

2.2.5.1. Індуктивні чутливі елементи

Рівняння, що визначає індуктивність обмотки, має такий вигляд:

$$L = \omega^2 / R_m, \tag{2.11}$$

де ω – кількість витків; R_m – магнітний опір обмотки, при $R_m = 1/\mu A$ буде:

$$L = \omega^2 \mu A / l. \tag{2.12}$$

де A – площа поперечного перерізу магнітного ланцюга; l – його довжина; μ – магнітна проникність магнітопроводу.

З цього рівняння випливає, що зміни індуктивності L можна досягти зміною довжини l магнітопроводу (з врахуванням повітряної шпарини при її наявності), його поперечного перерізу A та магнітної проникності μ. Довжина та перетин магнітопроводу є геометричними розмірами.

Магнітопружні чутливі елементи. Магнітна проникність може бути змінена шляхом прикладання механічних зусиль до осердя; датчики, побудовані за таким принципом, називаються *магнітопружними* чутливими елементами. Магнітопружні чутливі елементи сприймають безпосередньо прикладені зусилля і застосовуються як силовимірювачі, що працюють у жорстких умовах експлуатації. Використовуються в тих випадках, коли завищені у порівнянні з тензометричними чутливими елементами похибки виміру не мають великого значення, а вибір вимірювача зумовлений потребою великої потужності вихідного сигналу, який не потребує посилення. Магнітна проникність μ ряду речовин, особливо залізонікелевих сплавів, які містять ~ 80% нікелю, змінюється

під дією прикладених механічних напружень. У деяких сплавах механічні напруження 100 Н/мм^2 змінюють магнітну проникність приблизно на 40%, причому хід залежності змін магнітної проникності від прикладених навантажень близький до лінійної.

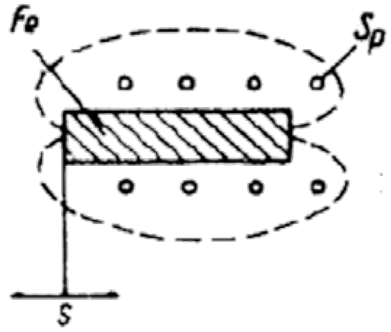


Рис. 2.16. Принципи дії індуктивного датчика з рухомим якорем

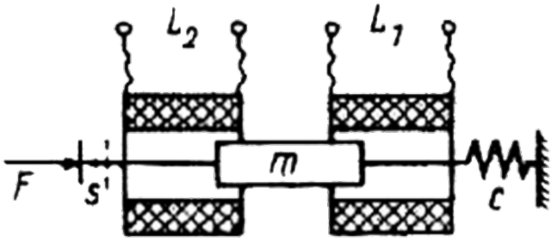


Рис. 2.17. Диференційна конструкція індуктивного датчика для вимірювання зусилля з рухомим якорем

Характеристики елементів

Вхідна величина: сила.
Вихідна величина: зміна магнітної проникності.
Діапазон вимірювання: від 100 Н до дуже великих зусиль.
Похибка від нелінійності: кілька відсотків.
Частотний діапазон: 0-10^3 Гц.

Переваги: простота конструкції, велика потужність вихідного сигналу.
Недоліки: нелінійність характеристики.

Чутливі елементи з осьовим переміщенням якорем. При переміщенні зображеного на рис. 2.16 залізного якоря F_e вздовж котушки S_p , відбувається перерозподіл числа силових ліній, що пересікають котушку. Такий стан викликає зміну індуктивності котушки L. Характер цієї зміни від переміщення якоря s – нелінійний. Переважно застосовують пристрій, показаний на рис. 2.17, що являє собою диференційно включені системи. В цьому випадку при ході якоря s індуктивність однієї котушки збільшується на + ΔL, а індуктивність іншої зменшується на рівне значення - ΔL. За допомогою мостової схеми різниця змін індуктивностей $L_1 - L_2 = 2\Delta L$ може бути перетворена в електричну напругу. Відповідне конструктивне виконання дозволяє одержувати лінійну залежність напруги від переміщення якоря в межах до 80% довжини котушки.

На відміну від описаних індуктивних елементів, вихідною величиною яких є зміна індуктивності, яка надалі за допомогою електричної схеми перетворюється в напругу, чутливі елементи, побудовані на диференційно-трансформаторному принципі, дозволяють безпосередньо отримувати як вихідну величину напругу ΔU (рис. 2.18).

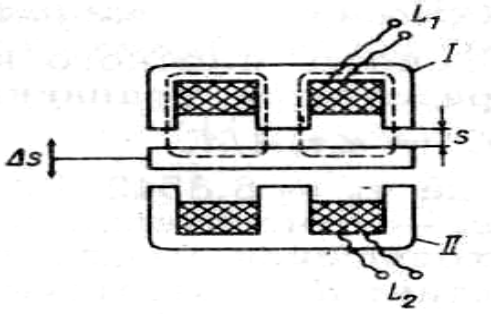


Рис. 2.18. Індуктивний датчик з диференційним трансформатором

У такій конструкції чутливий елемент складається з первинної котушки S_{p1}, до якої додана прикладена змінна напруга ~ U, і двох вторинних котушок S_{p11} , в яких при симетричній конструкції та середньому положенні якоря індукуються однакові напруги. Якщо вторинні котушки включити за різницевою схемою, то в такому разі різниця напруги на вихідних клемах дорівнюватиме нулю. При зміщенні якоря від середнього положення виникає різниця напруги ΔU, лінійно залежна від ходу якоря. Відповідне профілювання котушок і якоря дозволяє використовувати чутливі елементи цього типу для вимірювання кутів нахилу.

Характеристики елементів

Вхідна величина: лінійне та кутове переміщення.
Вихідна величина: зміна індуктивності, змінна напруга.
Діапазон вимірювання: 80% довжини котушки.
Похибка від нелінійності: 1-3%.
Частотний діапазон: 0-10^4 Гц.

Переваги: простота конструкції, висока чутливість, відсутність зносу, застосування при великих переміщеннях якоря.

Недоліки: нелінійність характеристики, чутливість до зовнішніх магнітних полів.

Чутливі елементи з поперечним переміщенням якоря. Індуктивний чутливий елемент з поперечним переміщенням якоря (рис. 2.19) призначений для вимірювання малих переміщень та їх змін.

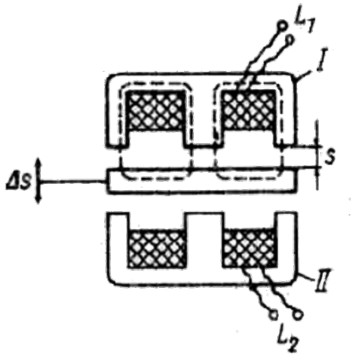


Рис. 2.19. Індуктивний датчик з поперечним переміщенням якоря відносно поля

Для досягнення якомога більшої чутливості та лінійності характеристики чутливий елемент виконують у вигляді здвоєних котушок з повітряними шпаринами. Котушки *I* і *II* однакові, якір розташований між двома магнітопроводами із шпаринами s. Наявність двох диференційно включених обмоток індуктивності не тільки забезпечує подвоєну чутливість і поліп-

шену лінійність характеристики в порівнянні з однокотушковою системою, а й одночасно компенсує вплив змін температури та потоків розсіювання.

Характеристики елементів

Вхідна величина: переміщення.
Вихідна величина: індуктивність.
Діапазон вимірювання: до 1 мм.
Похибка від нелінійності: 1-3%.
Частотний діапазон: 0-10^4 Гц.

Переваги: дуже висока чутливість, конструктивна простота.

Недоліки: нелінійність, незначний діапазон вимірювань, чутливість до зовнішніх магнітних полів, велике вимірювальне зусилля.

2.2.5.2. Ємнісні чутливі елементи

Основні положення. Ємність плоского конденсатора (рис. 2.20) без урахування крайового ефекту визначається рівнянням

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A/d, \qquad (2.13)$$

де $\varepsilon_0 = 8{,}8542 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²) – діелектрична постійна вакууму; ε_r – відносна діелектрична проникність середовища, яке знаходиться між пластинами конденсатора; A – площа пластин; d – відстань між ними.

Бачимо, що ємність конденсатора змінюється при зміні площі пластин, відстані між ними (шпарини) і діелектричної проникності матеріалу.

Чутливі елементи зі змінною шпариною. При зміні шпарини d між пластинами (рис. 2.20) на величину Δd ємність конденсатора визначатиметься рівнянням

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d+\Delta d} \approx \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}\left[1 - \frac{\Delta d}{d} - \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right]. \qquad (2.14)$$

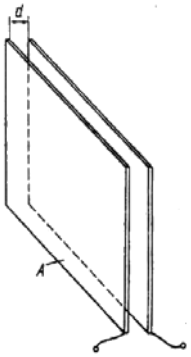


Рис. 2.20. Плоский конденсатор з шпариною d поміж обкладинками

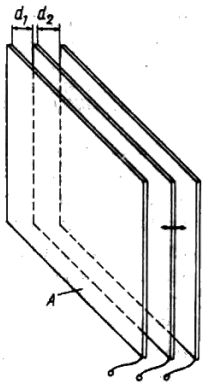


Рис. 2.21. Диференційний конденсатор; середня пластина рухається у поперечному напрямку

Очевидно, лише при малих відносних змінах шпарини $\Delta d / d$ залежність між $\Delta C / C$ і $\Delta d / d$ практично лінійна.

При Δd / d = 0,01 нелінійність складає ~ 1%, а при Δd / d = 0,1 - 10%.

Для забезпечення лінійності в широкому діапазоні знаходить застосування диференційний конденсатор (рис. 2.21).

При переміщенні середньої пластини на відстань *Δd* та електричному приєднанні за мостовою схемою зміна ємності такого конденсатора буде:

$$C = C_1 - C_2 = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}\left[2\frac{\Delta d}{d} + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right]. \qquad (2.15)$$

Подібно індуктивному чутливому елементу з поперечним переміщенням якоря і здвоєними обмотками, диференційний принцип і в цьому випадку одночасно з подвоєнням чутливості забезпечує розширення лінійного діапазону.

При Δd/d = 0,1 характеристика нелінійності такого конденсатора складе 1%.

Характеристики елементів

Вхідна величина: переміщення.
Вихідна величина: зміна ємності.
Діапазон вимірювання: до 1 мм.
Похибка від нелінійності: 1-3%.
Частотний діапазон: 0-10^5 Гц.

Переваги: незначна величина необхідних для вимірювань зусиль; достатня чутливість при високих температурах.

Недоліки: нелінійна чутливість; дуже великий внутрішній опір; необхідність застосування коротких підвідних проводів; чутливість до електричних завад.

Чутливий елемент зі змінним перекриттям пластин (рис. 2.22). У рівнянні для ємності конденсатора (ф-ла 2.14) величина А являє собою площу взаємного перекриття пластин. Поздовжнім зміщенням пластин стосовно одна одної на величину *s* можна змінити площу їх перекриття, причому для пластин прямокутної форми залежність *A = bs* лінійна. Оскільки величина А знаходиться в чисельнику рівняння ємності *C* конденсатора, то *C* лінійно залежить від *s*. Використання пластин різної форми дозволяє отримати квадратичні, логарифмічні та інші залежності.

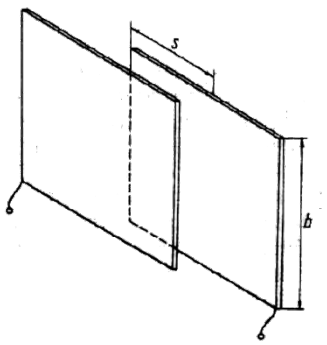


Рис. 2.22. Плоский конденсатор зі змінним перекриттям пластин

Конденсатор змінної ємності, що складається з круглих поворотних пластин, застосується для вимірювання кута повороту. Блоки поворотних пластин використовувались в частотних налаштуваннях коливних контурів у радіосистемах при амплітудній модуляції сигналів.

Характеристики елементів

Вхідна величина: лінійне і кутове переміщення.
Вихідна величина: зміна ємності.
Діапазон вимірювання: кілька сантиметрів; кутове переміщення – до 180 °.
Похибка від нелінійності: незначна.
Частотний діапазон: 0-10^5 Гц.

Переваги: лінійність характеристики; простота отримання характеристик складних залежностей ємності C від переміщення s.

Недоліки: чутливість до перешкод; високоомність; необхідність точного механічного виготовлення.

Чутливі елементи зі змінною діелектричною проникністю проміжку між пластинами

Ємнісні чутливі елементи, засновані на вимірюванні зміни ε, застосовують головно для визначення складу речовин за умови повного заповнення проміжку контрольованим середовищем та для вимірювання рівня заповнення проміжку при змінюваному рівні заповненні. Рівень можна змінювати як вздовж, так і поперек пластин. При контролі складу твердих речовин (наприклад, зерна, піску, гравію і т. ін.), а також рідин (парів, газів або вологих матеріалів) їх можна розміщувати усередині плоского або циліндричного конденсатора.

Для повністю заповненого проміжку вимірювального конденсатора існує пропорційна залежність між ємністю та його діелектричною проникністю

$$C_m/C_D = \varepsilon_m/\varepsilon_D. \quad (2.16)$$

Тут індекс m – еталонна речовина, а D – та, що підлягає дослідженням.

При порівняльних вимірах важливо, щоб діелектричні проникності досліджуваних матеріалів відрізнялися незначно. Істотна відмінність діелектричної проникності повітря та багатьох рідких і твердих матеріалів, передусім води, дозволяє вимірювати ємнісним методом положення рівня та стан заповнення ємностей, а також товщину льоду.

Характеристики елемента

Вхідна величина: діелектрична проникність.
Вихідна величина: зміна ємності.
Частотний діапазон: 0-10^4 Гц.

Переваги: безконтактність; придатність для вимірювання товщини ниток і плівок.

Недоліки: нелінійність; висока ємність.

2.2.5.3. Перетворення на основі зміни електричного опору

Термометр опору (терморезистор). Для вимірювання температур використовуються *температурні* залежності опору провідників і напівпровідників, які наведені на рис. 2.23 *(*найважливіші матеріали).

Дротяний термометр опору. Нехай опір деякого металу R_1 при температурі θ_1, а при температурі θ_2 – R_2 . З фізики відомо, що з великим ступенем точності

у визначеному інтервалі температур для кожного металу зокрема, представленого коефіцієнтом α, справедлива формула

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)]. \qquad (2.17)$$

Звідси випливає, що відносна зміна опору $\Delta R/R$ буде пропорційна $\Delta\theta$.

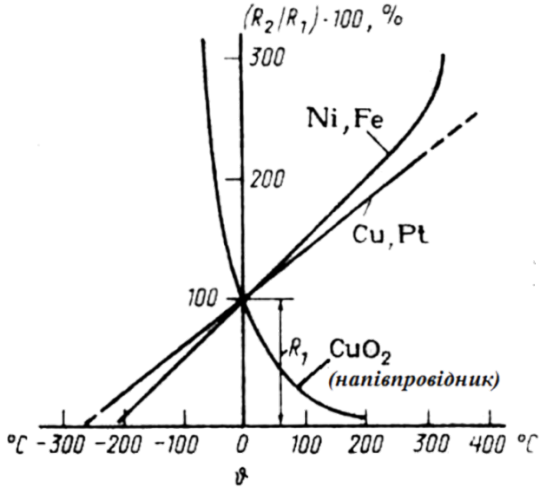


Рис. 2.23. Температурні залежності опору деяких найважливіших провідників і напівпровідників

Ця обставина дозволяє використовувати дріт з деяких металів для виготовлення термометрів опору. Найкращим матеріалом для цього є платина $\alpha_{Pt} = 3{,}85 \cdot 10^{-3°}C^{-1}$, причому з сприйнятливою нелійністю такі термометри використовуються в діапазоні температур $\{-200 \div +850°C\}$. Матеріали з доступною вартістю, такі як мідь та нікель, використовують для вимірювання температур, указаних на рис. 2.23.

Каркаси дротяних термоопорів виготовляють зі слюди, тугоплавкого скла або спеціальної кераміки. Виготовлений таким способом чутливий елемент розміщують у захисний чохол з легованої сталі або бронзи. Захисний чохол і матеріал каркаса акумулюють тепло. Внаслідок теплової інерції постійна часу такого типу датчиків складає 1-2 хв; із цієї причини вони застосовні лише для статичних вимірів температур. Похибка вимірів за допомогою термометрів опору залежить від нелінійності статичної характеристики, впливу температури на приєднувальні дроти і коливань напруги живлення.

Характеристики термометрів опору

Вхідна величина: температура.
Вихідна величина: опір.
Діапазон вимірювання: для нікелевих чутливих елементів від -200 до +150 ° С, для платинових – від -30 до +850 ° С.
Похибка: від ± 0,5 до ± 6° С в залежності від схеми вимірювання.
При великій ретельності виготовлення можна забезпечити абсолютну похибку 10^{-2} °С, відносну – 0,10 %.

Переваги: можливість забезпечення високої точності вимірювання.
Недоліки: велика інерційність.

Напівпровідниковий термометр опору. Характерною особливістю напівпровідників є великий від'ємний температурний коефіцієнт омічного опору. На відміну від металів, опір терморезистора зменшується при підвищенні температури (*рис.2.23*). При нагріванні його зміна підпорядкована залежності

$$R = a \cdot e^{b/T}, \tag{2.18}$$

де a – значення опору, залежне від величини і концентрації носіїв зарядів напівпровідника; b – енергетичний коефіцієнт; T – абсолютна температура.

Температурний коефіцієнт опору α залежить від температури так:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R}\frac{1}{\Delta T} = \frac{b}{T^2}. \tag{2.19}$$

Енергетичний коефіцієнт b може бути розрахований за результатами двох вимірів опору при відповідних температурах, а саме:

$$R_1 = \alpha \cdot e^{b/T_1}; R_2 = \alpha \cdot e^{b/T_2}; R_1/R_2 = e^{b(1/T_1 - 1/T_2)}; b = \frac{ln\, R_1 - ln\, R_2}{1/T_1 - 1/T_2}. \tag{2.20}$$

Коефіцієнт b не є постійною величиною, проте його зміна стає помітною лише при більш високих температурах. Завдяки великому питомому опору напівпровідникових матеріалів, які знайшли використання, терморезисторні чутливі елементи мають малі габарити і малу теплоємність. Тому малогабаритні терморезистори застосовують для динамічних вимірювань температур, а також для визначення температурних полів шляхом вимірювання в окремих точках. Перед використанням терморезистори підлягають штучному старінню.

Вугільні чутливі елементи. Пристосовані для вимірювання тиску чутливі елементи контактного опору складаються із зібраних в стовпчики вугільних дисків. При зміні тиску, що діє на диски, змінюється контактний опір між ними. Залежність опору від навантаження володіє гістерезисом в межах від 1 до 3%. Вугільні чутливі елементи конструктивне прості, допускають значні перевантаження і мають потужний вихідний сигналом, що не вимагає подальшого посилення, а також володіють добрими динамічними властивостями (гранична частота ~ 30 кГц). Похибка вимірювання складає 3-5%, внаслідок чого ці чутливі елементи застосовують для розв'язання простих вимірювальних задач.

Термоанемометри*. Провідник, що володіє опором R, по якому протікає струм I, розсіює за одиницю часу при стаціонарних умовах теплову енергію, що дорівнює $Q = I^2R$ (Дж/с, Вт). При постійній швидкості повітряного (газового) потоку, що оточує провідник, встановлюється визначена різниця температур провідника і навколишнього середовища. Зміна швидкості потоку, а також температури навколишнього середовища викликає зміну температури провідника, що впливає на його опір. В основному термоанемометричні чутливі елементи застосовують для вимірювання швидкостей потоків, визначення їх напрямків, а також для динамічних вимірювань температур.

*Анемометр (гр. Anemos вітер) – прилад для вимірювання швидкості повітряних потоків, в тому числі вітру або газу в турбінах, каналах тощо.

Вимірювання вологості. При вимірюваннях вологості визначають вологовміст твердих та газоподібних речовин. Оскільки електропровідність твердих і

сипучих матеріалів залежить від їх вологості, то для вимірювань вологості застосовують вимірювання опору. Наприклад, засовують пристрої з попереднім градуюванням, які побудовані з двох електродів відповідної конфігурації та розмірів, між якими розміщують середовище дослідження.

Для вимірювання вологості газів добре зарекомендував себе вологомір з хлористо-літієвим чутливим елементом, принцип дії якого оснований на визначенні точки роси.

Характеристики вологоміра

Вхідна величина: вологовміст.
Вихідна величина: зміна опору.
Діапазон вимірювань: 0 – 30 % відносної вологості.
Похибка: декілька відсотків відносної вологості.

Переваги: швидкодія, простота обслуговування.

Недоліки: результати вимірювань залежать від стану контрольованого матеріалу і температури оточення (наприклад, для зернових культур – від розміру зерна).

2.2.6. Перетворювачі оптичного випромінювання

2.2.6.1. Використання явища фотоефекту. Датчики на зовнішньому фотоефекті (фотоелемент, фотопомножувач) [30, 34, 39, 49]

В основі роботи таких приладів лежить явище зовнішнього фотоефекту, сформульоване законом Ейнштейна:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + E_e. \qquad (2.23)$$

Фізична суть цього закону така. При опроміненні розташованої у вакуумі металевої неокисленої поверхні (фотокатод) світловими квантами енергії останні вибивають із цієї поверхні електрони, які опиняються у оточуючому просторі. Якщо поруч із фотокатодом розмістити ще один електрод (анод) і прикласти до нього додатній зовнішній потенціал, то в колі потече так званий фотострум, величина якого буде пропорційна кількості квантів енергії, які потрапили на фото чутливу поверхню. Конструктивно електроди поміщають у герметичну скляну колбу (рис. 2.24). Якщо з неї видалити повітря, то такий приймач названо ***вакуумним фотоелементом***. У спеціальних випадках, для збільшення інтегральної чутливості фотоелемента, цю колбу після відкачування повітря заповнюють газом, переважно аргоном, під тиском декілька тор. Електрони, іонізуючи газ, збільшують анодний струм, який у газонаповненого елемента складається з електронного та іонного. Застосування набули вакуумні прилади, для яких у деяких межах світлового потоку можна забезпечити лінійність статичної характеристики. Якщо між фотокатодом та анодом розмістити додаткові чутливі електроди (діноди) з проміжним потенціалом, то конструкція набуде властивості підсилювача струму, а прилад отримає назву ***фотопомножувача*** (рис. 2.25).

Такі датчики світлової енергії відносять до датчиків пасивного типу, адже для їх роботи необхідне зовнішнє джерело високостабілізованої напруги.

Датчики на внутрішньому фотоефекті – фотодіод. Під поняттям «фотодіод» розуміють фотоелемент на внутрішньому фотоефекті. В цих приймачах в запірному шарі *p-n*-переходу здійснюється перетворення світлового потоку в електричні величини за рахунок явища внутрішнього фотоефекту. При опроміненні *p-n* -переходу на обкладинках структур виникає різниця потенціалів U_0, одночасно знижується його внутрішній опір R_i. Такий режим роботи названий *фотогальванічним* (рис. 2.26, *а*). Якщо з'єднати фотоелемент з зовнішнім опором $R_н$, то в ланцюзі з'являється фотострум:

$$I = U_0/(R_i + R_H). \qquad (2.24)$$

Встановлено, що струм $I_k = U_0/R_i$ короткого замикання ($R_н = 0$) пропорційний освітленості E (закон Столєтова), хоча U_0 і R_i є нелінійними функціями.

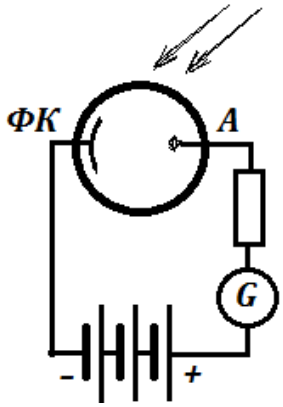


Рис. 2.24. Схематичне зображення та увімкнення фотоелемента на зовнішньому фотоефекті:
ФК – фотокатод; *А* – анод; *G* – гальванометр.

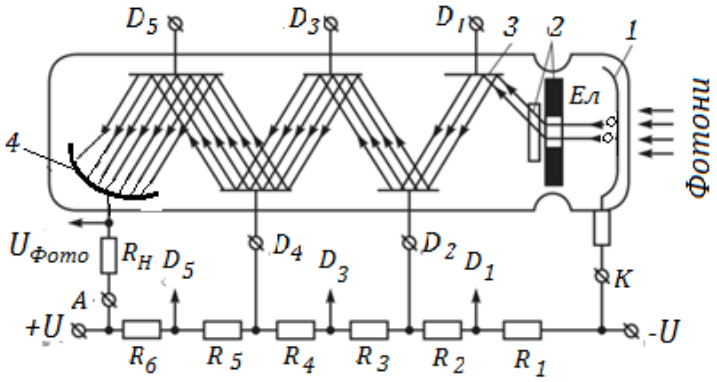


Рис. 2.25. Схематичне зображення та увімкнення фотоелектронного помножувача на зовнішньому фотоефекті:
1 – фотокатод (*К*); *2* – електроди фокусування; *3* – діноди $D_1 \ldots D_5$; *4* – анод (*А*); $R_1 \ldots R_6$ – подільник напруги; *Ел.* – фотоелектрони; *U* – напруга живлення; $U_{фото}$ – напруга фотоструму.

Залежно від схеми увімкнення фотоелементи на внутрішньому фотоефекті можуть працювати як у названому вище фотогальванічному – активному режимі (рис. 2.26, *а*), так і у фотодіодному (вентильний) – пасивному режимі (рис. 2.26, *б*), який потребує зовнішнього джерела живлення U_0.

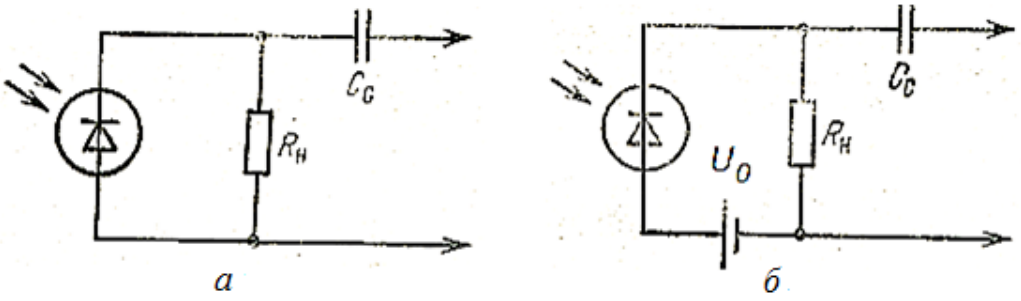


***Рис. 2.26. Схеми включення фотодіодів*:**
а – фотогальванічний; *б* – фотодіодний режим

Для світлових вимірювань у видимому діапазоні перевага надається селеновим елементам з тієї причини, що їх спектральна характеристика наближається до спектральної чутливості ока людини (функція видимості). У сонячних генераторах використовується кремній, оскільки спектральна чутливість кремнію значно розширена у ближню інфрачервону область (рис. 2.32), де сонячна радіація досить потужна.

Фототранзистори. Як і у діодів, при потраплянні світлових квантів на запірний шар у фототранзисторі вивільнюються додаткові носії зарядів. У фототранзисторах фотоелектричний ефект діода внаслідок прикладення зовнішньої напруги поєднується з ефектом посилення, властивий транзистору, що забезпечує більш ніж 30-кратне збільшення чутливості. Однак гранична частота (~20 кГц), дещо нижча, ніж у фотодіодів. Працюють лише в пасивному режимі з використанням зовнішніх джерел напруги.

Характеристики фотодіодів і фототранзисторів

Вхідна величина: освітленість.
Вихідна величина: опір, потенціал (струм).
Чутливість: 30 мА/лм (0,5 А/Вт) (фотодіод) і 130 мА/лм (фототранзистор).
Частотний діапазон: (0 ÷ 5) · 10^6 Гц (фотодіод), (О ÷ 3) ·10^4 Гц (транзистор).

Переваги: мала інерційність.
Недоліки: велика залежність темнового струму від температури; несприятлива спектральна характеристика, робота в пасивному режимі (транзистор).

**Примітка. Розгляду підлягають класичні вироби.*

Фотоопір. Якщо до обкладинок запірного шару *p – n*-переходу прикласти зовнішню напругу, то опір цього шару буде залежати від рівня його опромінювання світловою радіацією. При зростанні рівня опромінювання внаслідок надходження додаткових зарядів у зону провідності струм через перехід збільшується, що приводить до зниження опору запірного шару. Отже, це принцип роботи фотоопору.

Характеристики фотоопорів

Вхідна величина: освітленість.
Вихідна величина: постійний струм.
Чутливість: 0,25–1 мА / лм.
Похибка: кілька відсотків.
Температурна похибка: 0,2% / °С.
Частотний діапазон: 0 – 500 Гц.

Переваги: можливість коригування спектра чутливості відповідно до спектральної чутливості ока, дешевий у виготовленні.
Недоліки: інерційність, низька точність.

2.2.6.2. Вимірювальні перетворювачі із цифровим вихідним сигналом

[13, 18]

2.2.6.2.1. Загальні відомості

Однією з вимог, що висуваються до сучасних вимірювальних перетворювачів, є наявність вихідного сигналу у цифровій формі. Це дозволяє безпосередньо вводити результат вимірювання в електронно-обчислювальний процесор. Реалізація цифрових перетворювачів стала можливою саме завдяки стрімким досягненням мікропроцесорної техніки в обробці інформації .

За своєю природою зовнішнє оточення без впливу людини аналогове, на вхід перетворювача приладу надходить аналоговий сигнал. Це саме стосується і чутливої матриці фотоприймачів – кожна комірка формує заряд, величина якого пропорційна освітленості, якою опромінена фоточутлива поверхня цієї комірки. Переважно цифрова форма формується безпосередньо в корпусі фоточутливої матриці (за деякими винятками) спеціальною системою, яку називають аналогово-цифровим перетворювачем. Тут аналоговий вхідний сигнал перетворюється у цифровий. Отже, у матриці фотоприймачів аналого-цифровий перетворювач одночасно являє собою вимірювальний перетворювач по суті.

В даний час до практичного використання розроблені два типи датчиків: CCD-прилади з зарядовим зв’язком (ПЗЗ) і CMOS – компліментарний металооксидний напівпровідник (КМОН). Хоча технологія КМОН з’явилась раніше, але в подальшому технологія ПЗЗ завоювала беззаперечну перевагу внаслідок більш високої якості зображення і здобула основне місце для цифрових відеокамер. Але високі досягнення у напівпровідникових технологіях повернули у комерційне застосування КМОН-систем, які мають у порівнянні з ПЗЗ ряд істотних переваг, таких як низьке енергоспоживання та цифрова обробка безпосередньо у структурі матриці фотоприймачів. Особливим поштовхом до відродження КМОН стало масове використання цифрових камер у мобільних телефонах. Сьогодні КМОН-матриці досягли такого рівня, що їх якість зображення перевищує якість ПЗЗ-матриць. Зовнішній вигляд фоточутливої матриці, вмонтованої у корпус приладу, показаний на рис. 2.27.

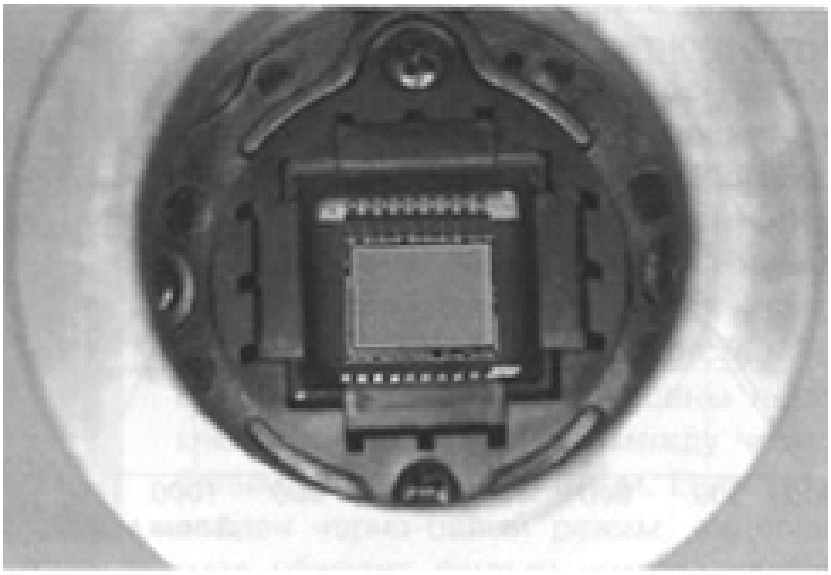


Рис. 2.27. Зовнішній вигляд фоточутливої матриці, вмонтованої у корпус приладу

2.2.6.2.2. Характеристики матриць

Розміри фоточутливих матриць показані на рис. 2.28. Для порівняльних характеристик габаритів ПЗЗ-матриць на рисунку використаний термін «форм-фактор», який потребує додаткових роз'яснень. Матриці любительських фотоапаратів від початку їх виникнення прийнято характеризувати числом, яке указує на діагональ фоточутливої матриці в частках дюйму, так як-от 1/2,5", 1/1,8", 2/3" і далі. Це число й отримало назву «формфактор», але воно не відповідає реальній діагоналі матриці, а складає лише близько 2/3 від істинної *величини* форм-фактору. Цей термін «перекочував» у цифрові сенсори з телебачення.

На початок становлення телебачення в телекамерах для реєстрації зображення використовувались електронно-променеві трубки, у яких із всієї фронтальної фоточутливої площини колби використовувалась прямокутна зона із співвідношенням сторін 4:3, діагональ якої складала приблизно 2/3 від діаметра колби. Саме цей віртуальний діаметр колби і використовується як параметр, який описує фізичний розмір ПЗЗ-матриць. Наприклад, ПЗЗ-матриці з діагоналлю 9 мм присвоєний формфактор 1/1,8", тоді як (1/1,8)×25,4 мм = 14,1 мм; якщо 14,1×(2/3), то отримаємо 9,4, що із заокругленням відповідає наведеному значенню 9 мм. Ще один спеціальний термін – це ***кроп-фактор (k)***, який показує, у скільки разів по діагоналі ця матриця менша від повного фотокадра (36×24 мм).

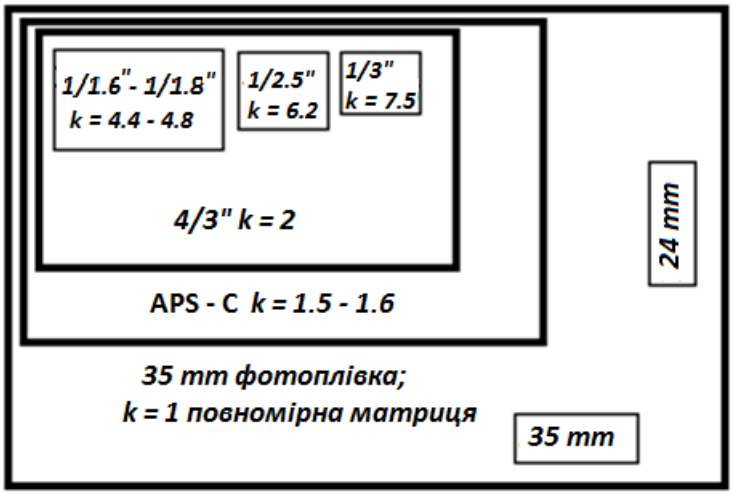


Рис. 2.28. Стандарти геометричних розмірів фоточутливих матриць (у дюймах) з вказівкою кроп-фактору (k)

Порівняльна характеристика CCD і CMOS. В CCD- і CMOS-матрицях для перетворення світла в електричний сигнал використовуються фотодіоди. Разом з цим сумісний принцип роботи вказаних детекторів істотно відрізняється, що описується нижче.

У приладах із зарядовим зв'язком (рис. 2.29**)** світло, яке потрапило на фоточутливу поверхню кожного пікселя, перетворюється в електричний заряд.

Заряди пікселів переміщуються прикладеною напругою по вертикальних та горизонтальних «транспортних шинах», поки не досягнуть підсилювача, де ці заряди

перетворяться в електричний сигнал**. Така конструкція має істотні недоліки, головний з яких – це потреба** високої напруги для почергового відкривання і закривання затворів, які мають бути в складі всіх пікселів для керування часовою послідовністю потоку зарядів. По-друге, потужність, що споживається ПЗЗ-матрицями, особливо велика для формату високої чіткості, наприклад 1080 pks, коли виникає потреба швидкого зчитування великої кількості пікселів.

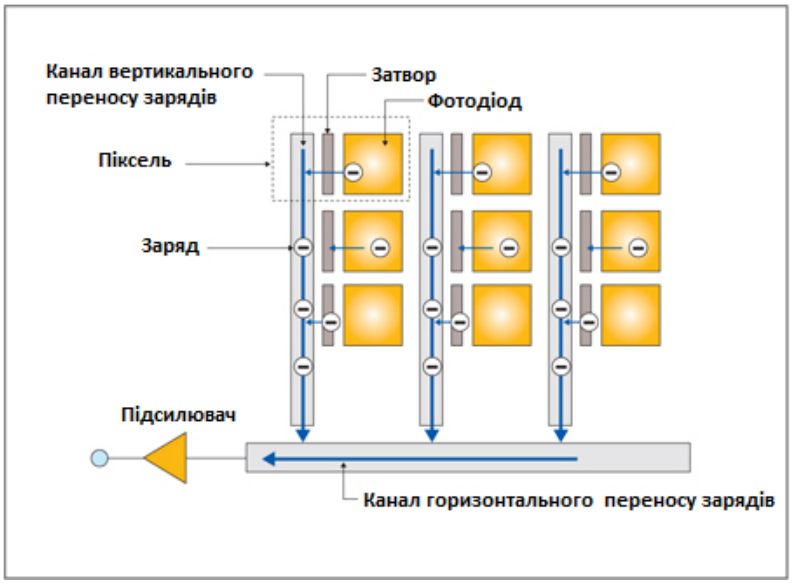


Рис. 2.29. Функціональна структура ПЗЗ-матриці

В КМОН-матрицях (рис. 2.30) підсилювач, розташований біля кожного пікселю, зразу ж перетворює заряд у електричний сигнал, який в подальшому просувається на вихід. Замість затворів тут використовуються перемикачі і внутрішні мережі, які керують послідовністю вихідних сигналів. Використання внутрішніх перемикачів дозволяє істотно понизити споживання струму при одночасному зчитуванні великої кількості пікселів, що характерне при обробці R, G, B-сигналів. Вказані обставини зв'язку виявляють такі переваги КМОН – матриць над ПЗЗ-структурами – компактність, швидкодія, мала потужність споживання і висока якість зображення.

Кількість елементів ПЗЗ-матриці. Найбільш поширеними фоточутливими матрицями є матриці з розмірами 768×576 pks та 512×576 pks, які орієнтовані відповідно на стандартний телевізійний сигнал та на сигнал відеоспостереження. Найбільшою з виготовлених і описаних в літературі матриць ПЗЗ є монокристалічний прилад корпорації Ford Aerospace розміром 4096x4096 pks зі стороною пікселя 7,5 мікрона.

При виробництві відсоток виходу якісних приладів незначний, тому для створення великоформатних матриць застосовується модульний принцип шляхом об'єднання менш габаритних, але більш технологічних. Так наприклад, з восьми ПЗЗ 2048x4096 pks компанія Loral Fairchild збирає мозаїку 8192×8192 pks з загальними розмірами 129×129 мм.

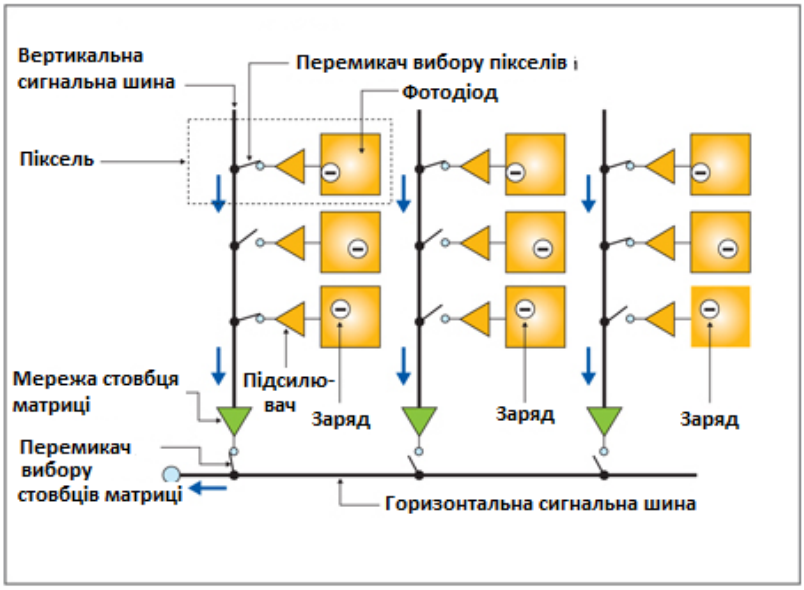


Рис. 2.30. Функціональна структура КМОН-матриці

Хоча ці цифри з кількості пікселів досить значні, але вони все ж таки значно менші в порівнянні з роздільністю фотографічної емульсії. Навіть найбільш крупнозерниста 35-міліметрова плівка містить в кадрі до 25 мільйонів роздільних зерен (фактично пікселів!).

2.2.6.2.3. Параметри матриць

Роздільна здатність. Роздільна здатність – один з основних параметрів фоточутливих матриць; визначається як максимальна кількість чорних та білих смуг, які можуть бути передані камерою і в подальшому розділені системою реєстрації при максимально можливому контрасті. Це означає, що камера дозволяє розглядати N/2 темних вертикальних штрихів на світлому фоні, зображення яких укладаються у вписаний в поле квадрат, якщо в паспорті камери указано, що її роздільна здатність складає N телевізійних ліній. Цей параметр визначається за стандартною телевізійною таблицею (рис. 2.31).

За одиницю вимірювання роздільної здатності в телесистемах береться так названа *ТВ*-лінія (*ТВЛ*), суть якої зводиться до наступного. Роздільність по вертикалі обмежується телевізійним стандартом – 625 рядків телевізійної розгортки, які за цією координатою не можуть передати більше 625 об’єктів. У технічному паспорті переважно указують роздільність по горизонталі. Наприклад, для телеспостережень загального характеру роздільність складає 380–400 *ТВ*-ліній, тоді як для спеціалізованих телесистем (телемоніторинг великого простору однією камерою, особливо зі змінним кутовим збільшенням) є необхідність більшої роздільності, починаючи з 570 *ТВ*-ліній і більше.

Роздільна здатність кольорових камер дещо нижча від чорно-білих.

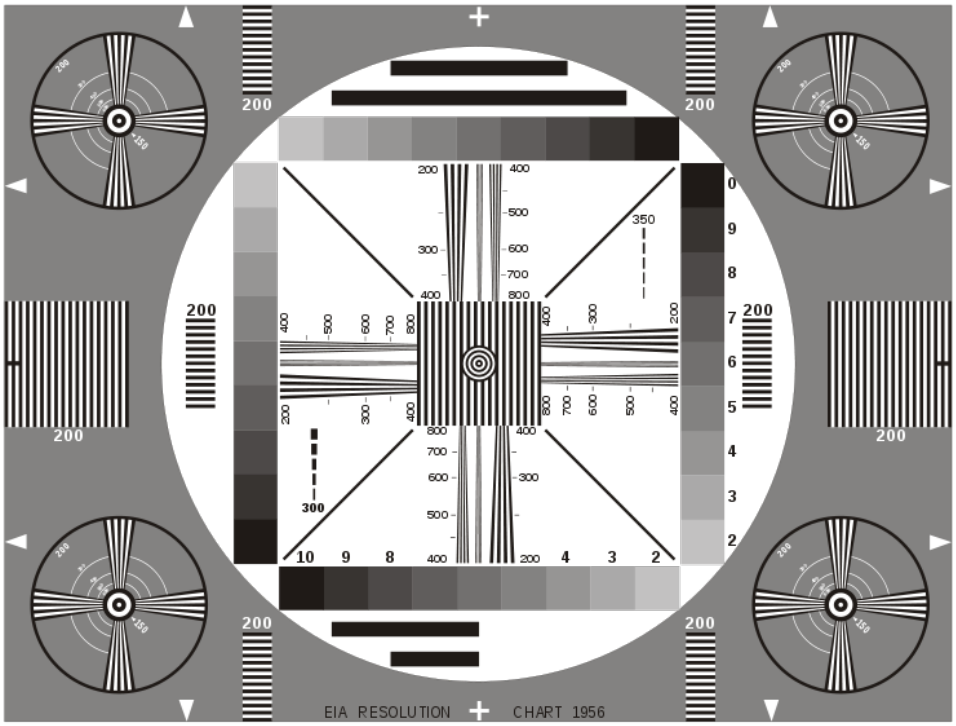


Рис. 2.31. Стандартна тестова таблиця для оцінки роботи телевізійних систем та матриць фотоприймачів

Причиною цьому є те, що структури пікселів кольорової та чорно-білої ПЗЗ-матриць відрізняються. Піксель кольорової матриці включає в себе комбінацію трьох пікселів, які роздільно реєструють червоний, зелений та синій кольори. Таким чином, з кожного елемента кольорової ПЗЗ-матриці знімається три сигнали (*RGB*-сигнал). Ефективна роздільність відповідно мала б бути в $\sqrt{3}$ разів гіршою, ніж у чорно-білих матрицях. Одначе у кольорової матриці роздільність погіршується менше, оскільки розмір її пікселю в порівняні з розміром такої ж чорно-білої матриці у півтора рази менший, що в результаті й веде до погіршення роздільної здатності лише на 30–40%. Негативною стороною цього є пониження чутливості кольорової матриці, тому що ефективна площа реєстрації елемента зображення стане значно меншою. Типова роздільна здатність кольорових телекамер складає 300 – 350 *ТВ*-ліній.

Динамічний діапазон та лінійність. Динамічний діапазон – це відношення максимально можливого сигналу, який сформований світловим приймачем, до його власного шуму. Для ПЗЗ цей параметр визначається як відношення найбільшого зарядового пакета, який може бути накопичений в пікселі, до шуму зчитування. Чим більший розмір пікселя ПЗЗ, тим більше електронів може утриматись в ньому. Для різних типів ПЗЗ ця величина складає від 75000 до 500000 і навіть більше. При $10e^-$ шумів (шум ПЗЗ вимірюється в електронах e^-) динамічний діапазон ПЗЗ досягає значень 50000. Великий динамічний діа-

пазон особливо важливий для реєстрації зображення при яскравому сонячному світлі або в нічних умовах при наявності великого перепаду освітленості, а саме: яскраве світло від ліхтаря і незасвічена (тіньова) сторона об'єкта.*

*Для порівняння: найкращі фотоемульсії володіють динамічним діапазоном лише приблизно 100. Динамічний діапазон людського ока: від яскравого сонячного світла (100000 лк) до 5-7 квантів світла, що складає 10^{10} (тобто 200 децибел!).

Лінійність ПЗЗ забезпечується з точністю до 0,1% практично у всьому динамічному діапазоні. В зв'язку з тим, що ПЗЗ позиційно стабільні (положення окремого взятого пікселю незмінне), то ця обставина дозволяє відносно легко апаратним способом коригувати неоднорідність чутливості по полю при випробуваннях кожного окремого екземпляра приладу.

Чутливість матриць. Чутливість матриці – параметр, який показує мінімальний рівень освітленості, при якій камера даватиме роздільне зображення. З пониженням освітленості переважно погіршується кольорова передача, а шум посилюється. В загальному, чим нижче значення мінімальної чутливості, тим краще; відповідно, при вищій освітленості зображення буде кращим.

Сучасні технології привели до появи відеокамер «День-Ніч», в яких при падінні освітленості нижче деякого рівня камера автоматично з кольорового переходить в чорно-білий режим, що дозволяє підвищити її чутливість і понизити шум. Відносна спектральна чутливість людського ока (функція видності) та ПЗЗ-приймача – на рис. 2.32.

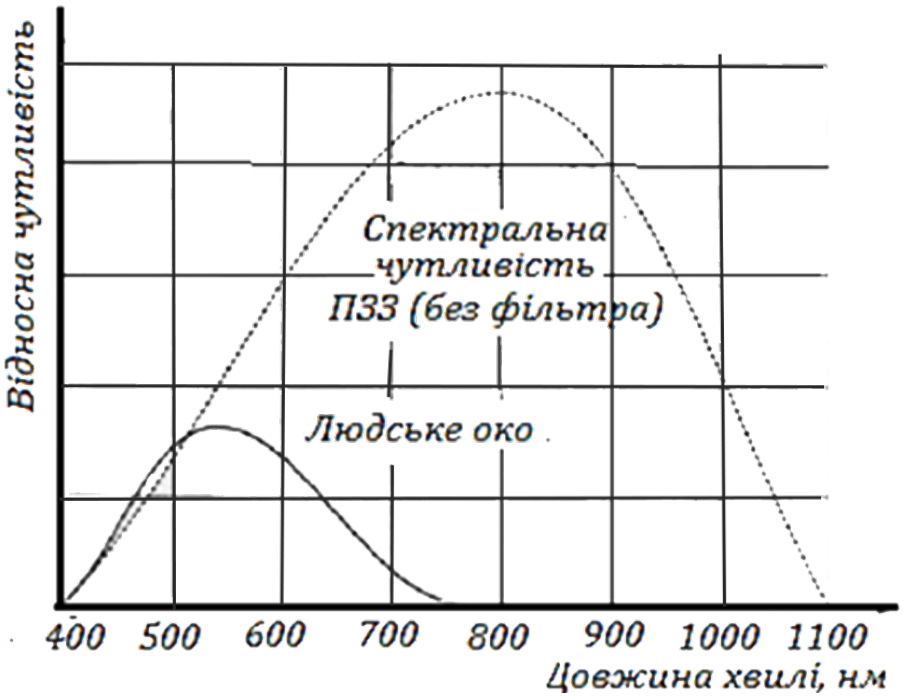


Рис. 2.32. Спектральна чутливість людського ока (функція видності) та ПЗЗ-приймача

Бачимо, спектральна чутливість ПЗЗ простягається до 1,1 *мкм*, що відповідає краю поглинання кремнію, з якого виготовлені матриці.

Шуми. Шумом називають довільне невизначене збурення деякого фізичного поля. Для матричних фотоприймачів означені такі види шумів:

- *фотонний шум;*
- *темновий шум;*
- *шум переносу зарядового пакету;*
- *шум зчитування;*
- *шум скидання, або kTC-шум.*

Фотонний шум. Є наслідком дискретної природи світла, виникає в результаті флуктуації фотонів фону та джерела випромінювання. Довільний дискретний процес підлягає статистиці Пуассона.

Шум темнового сигналу. Якщо на вхід матриці не подавати світловий сигнал, то на виході системи отримаємо так звані "темнові" кадри; інакше його називають «шум-сніжок». Основною складовою темнового сигналу є термоелектронна емісія. Чим нижча температура, тим менший темновий сигнал. Термоелектронна емісія також підпорядковується статистиці Пуассона. Переважно у всіх охоронних відеокамерах ПЗЗ застосовуються без активного охолодження, внаслідок чого темновий шум є одним з основних джерел шуму.

Шум переносу. Під час переносу зарядового пакета по елементах ПЗЗ до шин зчитування деяка частина електронів губиться. Вони захоплюються на дефектах і домішках, які існують в кристалі. Оцінки показують, що кількість загублених електронів складає кілька десятків.

Шум зчитування. Коли накопичений в елементі ПЗЗ сигнал виводиться з матриці, а потім перетворюється в напругу і підсилюється, то в кожному імпульсі виникає додатковий шум, який і називають шумом зчитування. Цей шум присутній навіть у зображенні з нульовим рівнем експозиції, коли матриця знаходиться у повній темноті і шум темнового сигналу дорівнює нулю. Типовий шум зчитування для якісних зразків ПЗЗ складає 15-20 електронів. В кращих зразках ПЗЗ, виготовлених корпорацією Ford Aerospace за технологією Skipper, досягнутий шум зчитування менше 1 електрона, а неефективність переносу складає 10^{-6}.

Шум скидання або kTC-шум. Перед введенням сигнального заряду до вузла детектування необхідно вивести попередній заряд. Для цього використовується транзистор скидання. Електричний рівень скидання залежить тільки від температури і ємності вузла детектування, що вносить шум.

Для типового значення ємності ($C = 0.1 пф$) при кімнатній температурі шум скидання складе близько 130 електронів. *kTC*-шум може бути повністю подавлений спеціальним методом обробки сигналу: двійковою кореляційною вибіркою (*ДКВ*). Метод *ДКВ* ефективно видаляє і низькочастотні завади, занесені зазвичай мережею живлення.

Оскільки основне навантаження системи охоронного телебачення припадає на темну пору доби (або ж незадовільне освітлення приміщень), особливо важливо приділити увагу малошумним відеокамерам.

На завершення як приклад наведемо параметри відеокамери *VN60CSHR-VF49IR:*

"День-Ніч". Розмір матриці 1/3 дюйма, технологія ПЗЗ, виробництво «Sony», роздільність 490 ТВЛ для кольорового режиму, 550 ТВЛ для чорно-білого, чутливість 0,2 люкс, відносний отвір об'єктиву 1:1,6 (F- число), фокусна відстань f=4.9мм. Напруга живлення 12В, струм споживання 120мА без ІЧ-підсвічування, 340мА з ІЧ-підсвічуванням. Ступінь захисту IP67, температура експлуатації: - 10…+50° С.

2.3. ІІ рівень – рівень функціональних перетворень

2.3.1. Вступ

Рівень функціональних перетворень є основним рівнем і забезпечує роботу приладу відповідно до призначення. Характеризується функцією перетворення сигналу (ФПС). Відповідно до технічної класифікації приладів (і апаратів), основні перетворення представляємо структурною схемою, поданою на рис. 2.33 [1]. Згідно зі схемою, прилади виконують три групи перетворень, кожна з цих груп має загальноприйняту назву:

1) перетворення інформації: ***вимірювальні прилади (ПВ)***;
2) перетворення енергії: ***прилади-генератори (ПГ);***
3) перетворення матеріалу: ***прилади-апарати (ПА).***

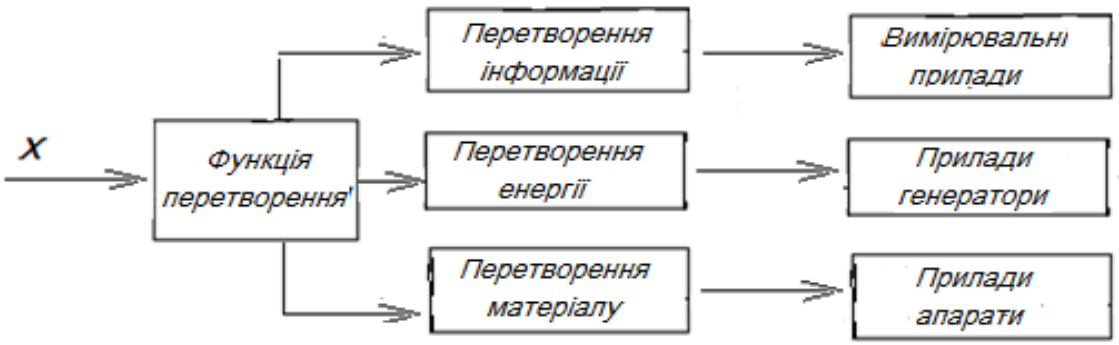


Рис. 2.33. Зміст функціональних перетворень приладів і апаратів

Основним атрибутом *вимірювальних приладів* є датчик фізичної величини, який перетворює вимірювальний параметр фізичного поля у форму, що підлягає подальшим перетворенням відповідно до функціональної структури (рис. 2.1).

Прилади-генератори не потребують датчика фізичної величини, формування первинного фізичного поля відповідно до призначення приладу здійснюється на рівні функціональних перетворень. Прикладами *ПГ* є: джерела світла, системи контролю потужності випромінювання та його стабілізації, різноманітні блоки

живлення та генератори (електростатичні, електромагнітні, високочастотні та надвисокочастотні, ультразвукові та ін.).

Системи, які забезпечують *перетворення матеріалу*, як зазначалось, називають апаратами; наприклад фотоапарат, рентгенівський апарат. *ПА* можна віднести до технологічних машин з обмеженими функціями. До таких систем належать пристрої контролю за зміною агрегатного стану речовини, за проведенням хімічних реакцій та біологічних перетворень. За іншими ознаками, системи *ПА* відносять до групи регулювально-керуювальних (технологічними процесами). Спрощена функціональна структура приладу наведена на схемі рис. 2.34 [1, 8].

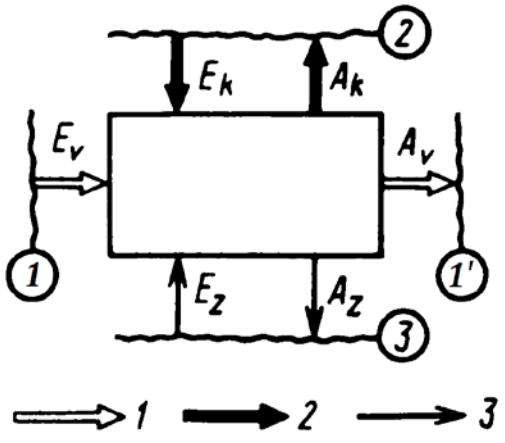


Рис. 2.34. Спрощена функціональна структура приладу та її графи (спряження):
1, 1' – вхідна та вихідна величини; *2* – величини комунікацій; *3* – величини збурень;
E_i – вхідні величини; A_i – вихідні величини (зворотні зв'язки)
Спряження *1* – рівень отримання представницької величини E_v;
Спряження *1'* – перетворена величина A_v;
Спряження *2* – комунікації (внутрішні та зовнішні);
Спряження *3* – збурення, які виникають в процесі роботи

2.3.2. Функція перетворення сигналу

Функція перетворення сигналу *(ФПС)* – це властивість технічної системи виконувати необхідні перетворення вхідного сигналу, які забезпечують виконання основної функції цієї системи; при розгляді перетворень руху механічними системами використовується поняття «Функція перетворення руху» [9].

Нехай x – первинне фізичне збурення на вході рівня функціональних перетворень приладу, а Y – його кінцева реакція. Перетворення F, які здійснюються цим рівнем, записуються так:

$$Y = F(x, q_{sn}). \qquad (2.25)$$

Тут $q_{s,n}$ – конструктивні параметри кожного s-елемента n-ланки ланцюга перетворення сигналу.

В загальному в приладах спостерігається довільне сполучення ланок перетворення сигналу. Однак переважає послідовне сполучення, спрощена структурна схема якого з вхідним збуренням у вигляді обертового руху маховика подана на рис. 2.35 [6, 8].

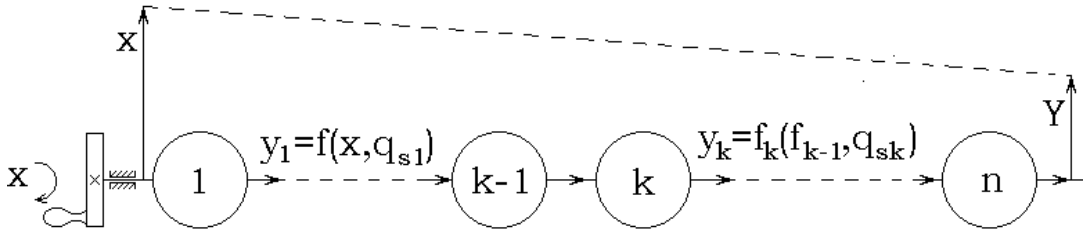


Рис. 2.35. Структурна схема перетворення сигналу при послідовному сполученні елементарних ланок перетворень:
1, …, k,…, n – структурні ланки перетворення;
$y_i = f_i(y_{i-1}, q_{sn})$ – функції перетворення сигналу окремих ланок;
q_{sn} – конструктивні (геометричні) параметри окремої *s*-елемента *i*-ланки.

В такому разі кінцеву ФПС приладу можна одержати методом послідовних підстановок:

$$Y = F(x, q_{sn}) = f_n(y_{n-1}, q_{sn}) = f_n(f_{n-1}\langle \dots \{f_2[f_1(x)]\} \dots \rangle). \qquad (2.26)$$

Тут f_n – функція перетворення сигналу n –ланкою.

В реальних конструкціях при наявності множини ланок перетворення сигналу використання методу за формулою (2.26) досить ускладнене. Спрощенню підлягають системи з лінійним перетворенням в межах окремої ланки. Можна показати, що в цьому разі ФПС записується у вигляді добутку передаточних чисел кожної ланки перетворення сигналу [9]. Математично:

$$Y = x \, \Pi_{k=1}^{n} \, i_k, \qquad (2.27)$$

де x – вхідна координата; i_k – передаточне число для k-ланки із множини $\{1 \div n\}$ ланцюга перетворень.

Формула (2.27) справедлива при умові, що i_k є постійною величиною для кожної з ланок в межах зміни x.

Перейдемо до рис. 2.35. Тут переміщення вхідної ланки як координата x та вихідна функціональна зміна (переміщення) Y умовно зображене у вигляді векторів, причому $x>Y$. Таке співвідношення x та Y характерне для більшості оптичних систем позиціювання, у яких межі переміщення вхідної ланки значно ширші від аналогічних меж вихідної.

Окрім послідовного сполучення, наявні ще три способи увімкнення ланок перетворення: *паралельний, комбінований* та *зі зворотними зв'язками*.

Для повноти викладу необхідний акцент щодо понять статичного та динамічного режиму роботи. Формули (2.25) та (2.26) описують так званий статичний – стаціонарний режим роботи; в такому стані функція перетворення сигналу є незмінною в довільний момент часу роботи технічної системи, незалежно від величини вхідного сигналу.

Динамічний режим – це стан роботи приладу (апарата), функція перетворення сигналу якого в загальному випадку описується формулою

$$Y = F(x, q_{sn}, t). \qquad (2.28)$$

Такий стан характерний для так званим параметричним системам [38, 47], для яких величина перетворень для одного й того ж значення вхідної величини *x* значення *Y* буде відрізнятися в різні моменти часу.

Зробимо застереження щодо відмінностей між статичними характеристиками датчиків фізичного поля (представлених на рис. 2.8 та формулою (2.3)), та такими ж характеристиками функціональних перетворень. Датчик, як відомо, здійснює перетворення деякого фізичного поля в іншу форму (переважно, в електричні величини), що відкриває можливість перетворення та зберігання отриманої інформації. До прикладу, мікрофон як датчик звуку перетворює звуковий сигнал у представницьку величину у вигляді електричного потенціалу. На рівні ж функціональних перетворень, в залежності від призначення, названий потенціал набуває спеціальних трансформацій. Наприклад, аналогово-цифрове перетворення, або ж підсилюватись (підсилювач звукової частоти), записуватись (магнітофон), передаватись по дротах або в ефір (передавачі).

Відповідна кількісна оцінка такого перетворення математично оцінюється так:

$$A(x, q_{si}) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta Y}{\Delta x} = \frac{dY}{dx}. \qquad (2.29)$$

Отримана в такий спосіб величина $A(x, q_{si})$ називається ***передаточною функцією (ПФ)*** технічної системи [6, 9]. Ця величина є параметричною функцією як координат функції перетворення $\{x, Y\}$, так і величини параметрів $\{q_{si}\}$ елементної бази *n*-ланок перетворення.

Передаточне число i_k, введене в (2.27), є виродженням змінної величини $A(x, q_{si})$, означеної формулою (2.29), у постійне значення (число).

2.3.3. Передаточні функції в перетвореннях сигналу

Математично *ПФ* встановлюється шляхом диференціювання. Можливі варіанти диференціювання прямого та оберненого розв'язків задач перетворення, тобто

$$A_{yx}(x, q_{si}) = dY/dx; A_{xy}(x, q_{si}) = dx/dY. \qquad (2.30\ а,б)$$

Перша – пряма передаточна функція, друга – обернена. Пряма отримується диференціюванням теоретичної функції перетворення сигналу. Для отримання оберненої передаточної функції необхідно мати у явному вигляді обернений розв'язок $x = F^*(Y, q_{sn})$. При неможливості провести розв'язок у явному вигляді, задачу розв'язують графічно, використовуючи числові параметри прямого розв'язку.

Зазначимо, що $A_{yx}(x, q_{si}) \neq A_{xy}(x, q_{si})$, оскільки похідні від прямої та оберненої функцій властивостями обернених перетворень не володіють.

Розрізняють *фізичний* та *технічний* зміст передаточних функцій. З *фізичної* точки зору, пряма *ПФ* встановлює максимально можливу чутливість (кінематичну або іншу) системи вимірювальних ланок, обернена функція – вхідної (керуючої) ланки або (та) ланок позиціювання. Для розуміння їх понятійних відмінностей необхідно послідовно прирівняти до одиниці знаменники співвідношень (2.30). В першому випадку (ф-ла 2.30, *а*), при одиничній зміні вхідної

величини dx, $A_{yx}(x, q_{si})$ покаже приріст основного параметра приладу, тобто dY. В другому (ф-ла 2.30, *б*) $A_{xy}(x, q_{si})$ продемонструє величину необхідного вхідного сигналу dx, що забезпечить одиничну або ж мінімально реєстровану реакцію на виході dY. *Технічний* зміст сформулюється при переході до кінцевих величин:

$$A_{yx}(x, q_{si}) \approx S_{yx}(x, q_{si}) = \Delta Y_{\text{вихід.}} / \Delta x_{\text{вхід.}},$$

$$A_{xy} \approx S_{xy}(x, q_{si}) = \Delta x_{\text{вхід.}} / \Delta Y_{\text{вихід.}}. \qquad (2.31\ a,\ б)$$

Акцентуємо увагу, що поміж величинами $A(x, q_{si})$ та $S(x, q_{si})$ в теорії приладобудування існує відмінність не лише в математичному тлумаченні, але й принципова. $A(x, q_{si})$ отримується шляхом диференціювання теоретичної функції перетворення сигналу, а $S(x, q_{si})$ – величина, що встановлюється дослідженням реальної, тобто вже виготовленої технічної системи, з врахуванням похибок виготовлення елементної бази приладу, її монтажу та наладки. В подальшому назвемо її *експериментальною передаточною функцією (ЕПФ).*

Пряма ЕПФ, тобто $S_{yx}(x, q_{si})$, носить назву *чутливості* вимірювального приладу, але в такому поданні відсутня конкретика технічного визначення.

Для означення конкретики, тобто для виявлення *технічного змісту,* формулу (2.31 *а*) напишемо так:

$$S_{yx}(x, q_{si}) = \Delta y / \Delta x_{\text{пор.}}, \qquad (2.32)$$

де $\Delta x_{\text{пор.}}$ – порогове, тобто мінімальне, значення вхідної величини x, яке викликає роздільну реакцію на виході $\Delta y_{\text{Р(вих.)}}$, що впевнено підлягає реєстрації споживачем.

Граничне значення роздільної реакції на виході можна кваліфікувати як *допуск* на точність функціонування, тобто

$$\Delta y_{\text{Р(вих.)}} = \Delta y_{\text{доп.}}. \qquad (2.33)$$

Як приклад, для пояснення цього тезису залучимо питання роздільної здатності спектрального приладу з використанням критерію Релея [35]. Відповідно до останнього, чутливість приладу визначається відношенням спектральної відстані між максимуми двох ліній, які впевнено розділяються (величина $\Delta Y_{\text{Р(вих.)}}$), до лінійної або кутової відстані між цими максимумами у площині візуалізації спектра, яка у формулі (2.32) представлена величиною $\Delta x_{\text{пор.}}$. Роздільна реакція спектрального приладу на виході матиме розмірність [*Å/mm*].

У механістичному тлумаченні чутливість вимірювального ланцюга виражається через відношення лінійного або кутового розміру інтервалу проділки до ціни проділки, тобто так:

$$S_{yx} = \Delta y_{\text{інт.}} / \Delta x_{\text{ц.прод.}} = \Delta y_{\text{доп.}} / \Delta x_{\text{ц.прод.}}\ . \qquad (2.34)$$

Експлуатаційники приладів у більшості випадків прагнуть одержати систему з вищими параметрами $S_{yx}(x, q_{si})$, що значно здорожує їх вартість.

Технічний зміст оберненої *ЕПФ,* тобто $S_{xy}(x, q_{si})$, сформулюється так:

$$S_{xy}(x, q_{si}) = \Delta x_{\text{пор.}}/\Delta y_{\text{доп.}}. \quad (2.35)$$

Отже, $\Delta x_{\text{пор.}}$ – порогове, тобто мінімальне значення сигналу на вході, яке викликає одиничну роздільну реакцію на виході, гарантованого технічними умовами, що іменується, як вже зазначалось, допуском на точність функціонування приладу $\Delta Y_{\text{доп.}}$. Переважно ця гарантована реакція на виході відповідає одиниці зчитуваної інформації, тобто ціні проділки шкали приладу $\Delta y_{\text{ц.прод.}}$.

Для механічних систем, побудованих за принципом кінематичних ланцюгів (рис. 2.35), $S_{xy}(x, q_{si})$ виражає співвідношення між найбільш допустимим пороговим зміщенням робочого елемента на виході ланцюга (Y) і найменш можливим зміщенням органу керування на його вході (x) [6, 29].

Розмірність ЕПФ залежить від характеру перетворення; але навіть при тотожних перетвореннях чисельник і знаменник не зводять до одного масштабу, а указують реальні величини, які підлягають зчитуванні. Наприклад, вищезгадувана розмірність роздільної здатності *[Å/mm]* або ж для електричних систем *[mV/V]*.

Як приклад розглянемо прилад, у якому вхідною ланкою є рукоятка обертання (маховик) зі шкалою відповідно до рис. 2.35, а вихідною – деяка система позиціювання, наприклад зорова трубка прицільного пристрою. Для розгляду беремо співвідношення (2.35). Дійсне значення $\Delta x_{\text{дій.}}$ не може бути менше порогового $\Delta x_{\text{пор.}}$, але воно може бути більшим, тобто буде спостерігатися зростання значення $S_{xy}(x, q_{si})$. Але такому зростанню буде сприяти і зменшення допуску на точність позиціювання $\Delta Y_{\text{доп.}}$, як випливає з формули (2.35). Таке зростання не може здійснюватися за рахунок подовження кінематичного ланцюга та збільшення кількості кінематичних пар, наслідком чого буде ускладнення конструкції, що має відомі негативні наслідки. Необхідний пошук інших варіантів вказаного зростання, оскільки це створить запас чутливості і забезпечить більш надійне виконання основної функції приладу – точності позиціювання [6, 45].

Отже, *пряма ЕПФ,* тобто $S_{yx}(x, q_{si})$, указує на чутливість ланцюга перетворення сигналу, а *обернена ЕПФ,* тобто $S_{xy}(x, q_{si})$, виражає кінематичну чутливість ланцюга керування системою позиціювання приладу.

Підіб'ємо деякі підсумки з наведеного. Апарат передаточних функцій в теорії приладобудування введений з певною метою. *По-перше*, для встановлення чутливості системи; на першій стадії визначення цей параметр встановлюється шляхом диференціювання теоретичної або експериментальної функції перетворення сигналу, а на другій – дослідженням експериментального зразка приладу.

По-друге, для виявлення оптимальних вимірювальних меж приладом; ці межі встановлюються дослідженням функції перетворення сигналу та її похідних; залежать не лише від абсолютних значень інформаційних параметрів (параметрів перетворення), а й від таких понять, як стійкість роботи, відтворюваність результатів.

По-третє, знання ПФ дає можливість розрахувати ціну проділки шкали вимірювального приладу, оптимізувати параметри окремих ланок перетворення.

Встановлення ціни проділки $\Delta x_{\text{ц.прод.}}$ установочної шкали приводу керування проводиться за формулою

$$\Delta x_{\text{пор.}} = k\,\Delta x_{\text{ц.прод.}} \qquad (2.36)$$

Тут $\Delta x_{\text{пор.}}$ (указано формулою 2.35) – порогове, тобто мінімальне значення сигналу на вході, яке викликає одиничну роздільну реакцію на виході Δy – допуск на точність функціонування приладу. Переважно, ця гарантована реакція на виході відповідає одиниці зчитуваної інформації, тобто ціні проділки шкали приладу $\Delta x_{\text{ц.прод.}}$. Тоді, знаючи допустиму похибку функціонування $\Delta y_{доп.}$ і чутливість приладу S_{yx}, з врахуванням (9), ціна поділки встановиться так:

$$\Delta x_{\text{ц.прод.}} = \frac{\Delta y_{\text{доп}}}{k} S_{yx}. \qquad (2.37)$$

У формулі (2.36) k може бути як більше, так і менше одиниці. Одначе в більшості випадків точність зчитування результатів має перевищувати похибку приладу, тобто k<1. Розглянемо два випадки. При єдиній реперній лінії, що використовується для зняття візуального відліку результату вимірювання за шкалою приладу, прийнято, що точність зчитування результатів складає 1/10 лінійного інтервалу, що припадає на одну поділку. В такому разі коефіцієнт k=0,1. В конструкціях з ноніусною шкалою, як свідчить науково-технічна література [6, 9, 45], параметр k складає порядок $0{,}02 \div 0{,}05$.

Рівності (2.36) та (2.37) використовуються для розрахунків числових параметрів так званих замикаючих ланок вимірювального ланцюга приладів, як це показано далі (Ч.5, п. 5.8) на прикладі індикатора годинникового типу.

Розглянуті питання демонструють лише незначний фрагмент ролі передаточної функції в теорії приладобудування. Взагалі, в теорії обробки сигналів її місце важко переоцінити.

2.4. III рівень: підсилення перетвореної величини

На вхід даного рівня надходить перетворена величина $y = F(x, q_{s,i})$, яку за ознаками можна вважати сигналом. Рівень потужності цієї величини має бути достатнім для сприйняття людиною, якщо це вимірювальний прилад, або ж для керування технологічними операціями чи для перетворення матеріалу (генератор, апарат). На разі відсутності належного рівня здійснюється підсилення перетвореної величини. Системи підсилення принципово різняться в залежності від фізичної природи названої величини.

Механіка: характер перетворення та елементна база демонструється в табл. 2.4. Функціональні перетворення механічних величин, наведених в таблиці, до рівня підсилення не відносимо.

Спостерігаємо такі зміни масштабу перетворень механічних величин: лінійне та кутове переміщення, лінійна та кутова швидкості, сила та момент сили [9, 11].

Таблиця 2.4

Елементна база та характер перетворення механічних величин

Найменування	Вхідна величина	Вихідна величина
Перетворення масштабу механічних величин		
Важіль I і II роду Зубчаста передача	Переміщення, сила Кут повороту, обертовий момент, кількість обертів	Переміщення, сила Кут повороту, обертовий момент, кількість обертів
Перетворення виду механічних величин		
Зубчаста рейка	Кут повороту, лінійне переміщення	Лінійне переміщення, кут повороту
Ланцюг і ланцюгове колесо	Кут повороту, лінійне переміщення	Лінійне переміщення, кут повороту
	Деформація, сила	Сила, деформація
Плоска пружина	Деформація, сила	Сила, деформація
Гвинтова пружина Спіральна пружина	Кутове переміщення, момент сили	Момент сили, кутове переміщення

Електрика: трансформатори напруги та струму.

Електроніка: підсилювачі [26, 39]. Підсилювач – це пристрій, який забезпечує перетворення вхідного сигналу в сигнал більшої потужності *без спотворення* його форми або зі спотвореннями в допустимих межах.

Підсилення потужності електронного сигналу можна здійснити двояко: підсиленням струму або напруги.

Підсилювачі класифікують за такими ознаками:

- за родом підсилювальної величини;
- за характером підсилювальних сигналів;
- за смугою підсилювальних частот;
- за фізичним принципом роботи активних елементів.

За родом підсилювальної величини розрізняють:

- підсилювачі напруги;
- підсилювачі струму;
- підсилювачі потужності.

За характером підсилювальних сигналів розрізняють:

- підсилювачі гармонійних сигналів;
- підсилювачі імпульсних сигналів;

За смугою підсилювальних частот розрізняють:

- підсилювачі постійного струму;
- підсилювачі змінного струму.

Підсилювачі змінного струму в свою чергу поділяють на:

- підсилювачі низької частоти;
- підсилювачі високої частоти;
- смугові підсилювачі.

За фізичним принципом роботи активних елементів розрізняють:

- лампові підсилювачі;
- транзисторні підсилювачі;
- діодні підсилювачі;
- параметричні підсилювачі.

Структурна схема підсилювача електронного сигналу зображена на рис. 2.36.

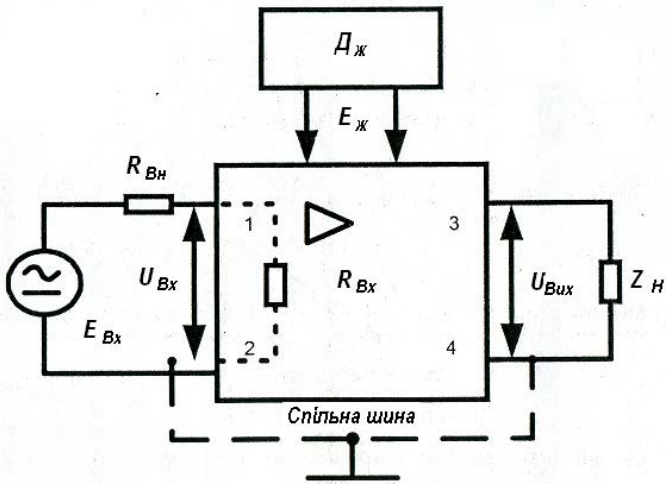


Рис. 2.36. Структурна схема підсилювача електронного сигналу

Джерело електронного сигналу описується величиною електрорушійної сили E_{Bx} та внутрішнім опором $R_{Bн}$; сигнал, який підлягає підсиленню (U_{Bx}), підключений до затискачів (1-2). Ефект підсилення можливий за наявності додаткової енергії – джерела живлення *(Дж)*. Енергія джерела живлення (напруга $E_Ж$) перетворюється підсилювачем в енергію корисного сигналу з напругою $U_{Вих}$ та коефіцієнтом підсилення K і вхідним опором R_{Bx}; напруга $U_{Вих.}$ на затискачах (3-4) підведена до зовнішнього навантаження Z_H .

2.5. IV рівень – рівень технологічних функцій

Рівень технологічних функцій властивий таким виробам:

- приладам-генераторам;
- регулювально-керувальним приладам;
- апаратам.

Системи та елементна база цього рівня здійснюють вплив на матеріали з метою перетворення їх фізико-механічного або хімічного стану.

Наведемо кілька прикладів. Генератори фізичних полів (прилади фізотерапії); антени-випромінювачі фізичних полів; фото (рентген) апарати; конструктивні системи зчитування зображення.

До систем *як виконавчих органів апаратів* віднесемо так названі *приводи,* які можна вважати підсилювачами. Основні типи приводів: електропривід, гідропривід і пневмопривід.

Гідравлічні підсилювачі. Ці конструкції включають в себе систему тіл, у складі яких одночасно з твердими тілами (механічними елементами) використовується рідина. Принципова схема цих механізмів показана на рис. 2.37 [69]. Основними частинами довільного гідроприводу є гідронасос та гідродвигун.

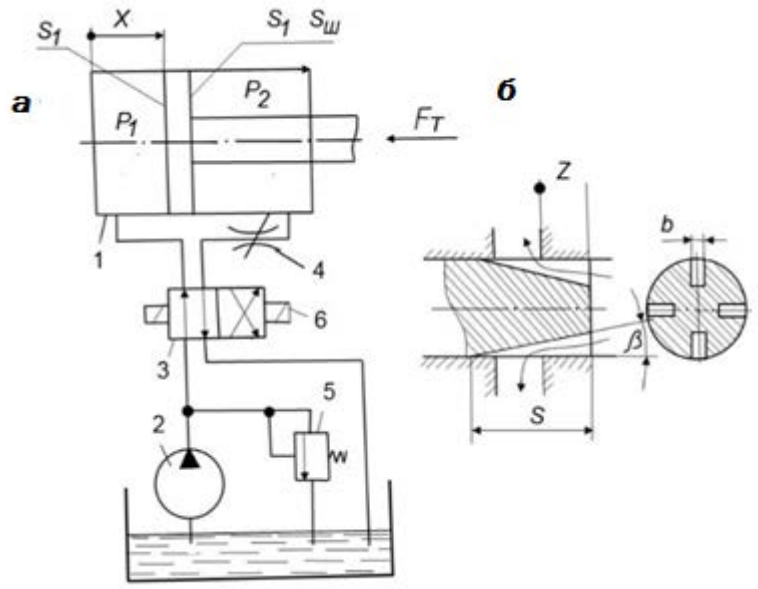


Рис. 2.37. Принципова схема гідравлічного приводу

Гідронасосом (скорочено – насосом) називається машина, призначена для перетворення механічної енергії твердого тіла в механічну енергію рідини (рух рідини).

Гідродвигуном називається машина, призначена для перетворення механічної енергії рідини в механічну енергію твердого тіла. У деяких випадках один і той же пристрій виконує як функції насоса, так і функції двигуна.

На рис. 2.36 показана схема типового гідроприводу, який застосовується в машинах-автоматах. Гідродвигун *1* у вигляді гідроциліндра, виконаний у вигляді поршня; переміщується у циліндрі під дією стисненої рідини. Стиснення здійснюється насосом *2,* який сполучений трубопроводами з резервуаром рідини та гідроциліндром. Створено різноманітні конструкції насосів, в межах окремих моделей насоси різняться за продуктивністю та величиною тиску на виході.

Зміна напрямку руху поршня гідроциліндра забезпечується розподільником *3*. В положенні розподільника, який показаний на схемі, рідина надходить у ліву порожнину гідроциліндра, при цьому поршень буде рухатися вправо. При переміщенні рухомої частини *6* розподільника вліво рідина від насоса піде у праву порожнину гідроциліндра, а поршень буде переміщуватися вліво. Для такого перемикання на схемі необхідно уявно перемістити правий квадрат розподільника вліво, залишаючи при цьому перехрещені лінії зі стрілками. Отже, рідина з насоса через елемент *4* потрапить в праву частину гідроциліндра; при цьому трубопровід лівої частини циліндра сполучиться з трубою зливу рідини у резервуар.

Переміщення рухомої частини *6* розподільника здійснюється двома електромагнітами. Елемент *4* виконує функцію гальмівного пристрою, називається *дроселем* (рис. 2.36, *б*) і забезпечує регулювання протоку (кількості) рідини. При переміщенні рухомої частини *z* дроселя змінюється площа похідного перетину.

При перекритті трубопроводу тиск у правій (або лівій) частині циліндра залишиться незмінним і рух поршня зупиниться. Рухома деталь дроселя називається *золотником*. Переміщення *z* може бути заданою функцією часу або переміщення поршня *x*. В першому випадку золотник гальмівного пристрою має незалежний програмований привід переміщення, а в другому його рух здійснюється кулачками, які в свою чергу пов'язані з рухом штоку поршня.

Переливний клапан *5* служить для зливу надлишкової рідини, що подається насосом, при сповільненні руху поршня. Пружина клапана підібрана так, що він відкривається при досягненні належного тиску.

Гідродвигун *1* у цій схемі називається об'ємним, оскільки перетворення енергії рідини в механічну енергію поршня відбувається при періодичних змінах об'ємів робочих порожнин циліндра. Відповідно і ввесь гідропривід називають об'ємним. Цей привід називають також гідравлічним механізмом, який виконує перетворення обертового руху валу насоса в прямолінійний рух поршня.

2.6. Комуніканти

Комунікативні функції елементної бази технічної системи – взаємний обмін інформацією всередині приладу та із зовнішнім середовищем. До зовнішнього середовища належать: 1) технічні засоби, які взаємопов'язано виконують основну функцію; 2) засоби телеметрії та телекомунікацій; 3) людина як оператор даного приладу. Зв'язок із людиною забезпечують: 1) відліковим пристроєм – частина конструкції вимірювального приладу, призначена для відліку значень вимірювальної величини; 2) пристрій реєстрації – частина конструкції приладу, призначена для реєстрації показань вимірювань.

Роль комунікативних факторів постійно зростає внаслідок зростання рівня автоматизації технологічних процесів, лавиноподібного збільшення номенклатури приладів зі зростанням кількості користувачів із недостатнім рівнем освіти для розуміння явищ та процесів, що лежать в основі принципів роботи приладів. Комунікаційні функції забезпечують керування приладом через: 1) перетворення зовнішніх керуючих величин у внутрішні (див рис. 2.34); 2) контроль виконання функцій через перетворення внутрішніх контрольних величин у зовнішні; 3) керування функціями інших технічних пристроїв та контроль за їхньою працездатністю.

Елементну базу, яка забезпечує комунікативні функції, будемо називати ***«комунікантами»***.

До елементної бази та систем комунікацій відносять: роз'єми, кабелі, електромагнітні сигнали оптичного та радіодіапазону, сигнальну індикацію (звукова та світлова), перемикачі, стрілочні та цифрові індикатори, тощо.

Обмін інформацією між людиною і приладом здійснюється: 1) механічно; 2) за допомогою органів відчуття людини: оптичний (зір) та акустичний (слух) канали, тактильні (дотик) та нюхові рецептори.

Для механічного вводу інформації використовуються: 1) силові зусилля кінцівок людини, які здійснюють механічні переміщення інструментів керування; 2) тактильні властивості людини (дотик кінцівками до сенсорів); 3) датчики, які накладаються на сухожилля та м'язи і реагують на їх напруження.

Головним каналом сприйняття інформації у людини є оптичний.

Акустичний канал має ту перевагу, що інформація може бути доведена одночасно до широкого кола людей.

Кодування сигналів для обміну інформацією між технічними системами здійснюється за допомогою стандартних сигналів, так званим ***інтерфейсом.***

3. Рівень надійності, забезпечення та керування

3.1. Надійність технічної системи

[1, 14, 15, 16]

3.1.1. Базові означення

Надійність технічної системи (ТС) (ДСТУ ГОСТ 13377-75) [14] – це властивість виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники протягом встановленого часового інтервалу, в межах встановлених технічною документацією на виріб режимах (параметрах) роботи, *при дотриманні умов експлуатації, регламенту, технічного обслуговування, зберігання і транспортування*.

Під *напрацюванням* розуміють тривалість або обсяг роботи ТС, вимірювані в годинах, циклах, тиражах, упродовж розглядуваного періоду.

Таке визначення надійності охоплює два найважливіші аспекти функціонування ТС: виконувати свої функції відповідно до технічних умов і безвідмовність роботи впродовж деякого терміну. Порушення будь-якої з цих умов кваліфікує виріб як відмова.

Відмова – цілковита або часткова втрата працездатності *ТС*. За цілковитої відмови виріб перестає функціонувати, за часткової – можлива його експлуатація з меншою продуктивністю.

Безвідмовність – властивість технічної системи зберігати працездатність упродовж певного терміну чи напрацювання без вимушених перерв.

3.1.2. Стадії роботи виробів нової техніки

Загальна закономірність природного зносу випливає із залежності ймовірності безвідмовної роботи виробу *R(t)* (рис. 3.1.1 *а*) або ймовірності відмов *F(t)* (рис. 3.1.1 *б*) та характеризується трьома стадіями.

Перша: стадія приробки поверхонь контакту деталей, стадія виявлення прихованих (невидимих) дефектів деталей, вузлів та їх складання. В процесі приробки відбувається згладжування мікронерівностей на поверхнях взаємодії спряжених деталей (поверхнях кінематичних пар), які залишаються після оброблення їх на верстатах. За час прироблення збільшується зазор між деталями до нормативних величин. Кінець прироблення визначається значним зменшенням зносу порівняно з початковим. На 1-й стадії найбільш помітно проявляються дефекти в деталях, а також дефекти неякісного монтажу. Вплив цих дефектів може бути значно підсилений порушеннями процесу прироблення (обкатки). Зазвичай у початковий період роботи надійність визначається ймовірністю відмов дефектних деталей. Причиною особливих умов зміни технічного стану на 1-й стадії є істотний вплив індивідуальних якостей обслуговуючого персоналу, що особливо проявляється при впроваджуванні нових видів устаткування; велика кількість відмов у початковий період може бути результатом недостатнього знання обслуговуючим персоналом особливостей будови й експлуатації машини.

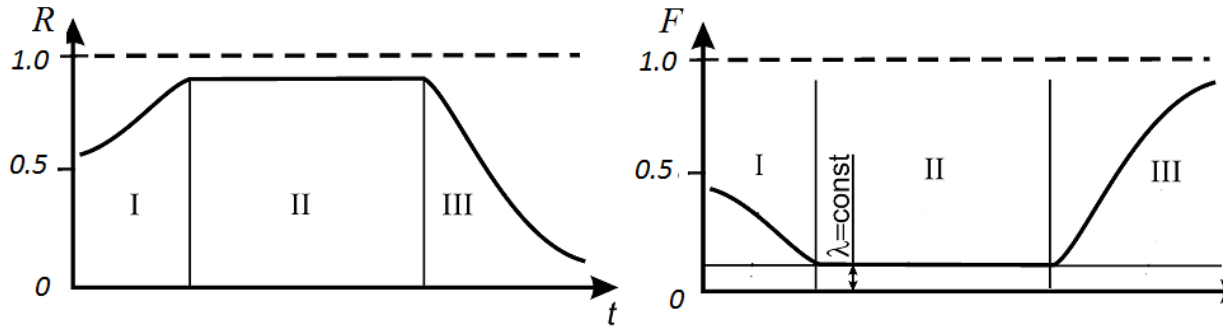


Рис. 3.1.1. Стадії роботи виробів впродовж терміну експлуатації (імовірність безвідмовної роботи R (а) та ймовірність відмов F (б) технічної системи від часу експлуатації t – вік виробу):
I – стадія приробки; *II* – стадія прогнозованого терміну роботи; *III* – стадія деградації

Друга: стадія розрахункового терміну експлуатації, є основним часом роботи машини і визначає термін її служби. У цей період знос стабілізується, його інтенсивність має лінійний характер. Для стадії характерний прояв мінімальної інтенсивності відмов, яка визначається випадковими причинами. Протягом цього періоду істотно проявляється поєднання закономірностей зміни фізико-механічних властивостей матеріалів з характером дії навантажень (статичний, динамічний, знакозмінний). Наявний вплив дефектів, які не були виявлені в період приробки.

Третя: стадія граничного стану, різкої деградації. Після досягнення граничного стану працездатність різко понижується. На цій стадії інтенсивність негативної зміни технічного стану прогресивно зростає внаслідок сумісного впливу випадкових і зношувальних причин. Проявляються наслідки граничних спрацьовувань, зростаючі динамічні навантаження, погіршення умов змащування тощо. Різко зменшуються експлуатаційні параметри та характеристики деталей, складальних одиниць, виходячи з допустимої межі, що врешті-решт викликає повну втрату дієздатності технічної системи.

Закономірність зміни ймовірності безвідмовної роботи *R* та частоти відмов *λ,* зображених на рис. 3.1 *а, б,* відповідає трьом вищеназваним стадіям.

Зазначимо, що розрахунки на довговічність і надійність роботи машини ускладнені, їх наближення до реальних значень коливаються у великих межах.

3.1.3. Класифікація відмов за технічними ознаками

За об'ємом:

Повна відмова – відмова, при якій функціонування виробу неможливе.

Часткова відмова – відмова внаслідок виходу за допустимі межі одного або декількох параметрів, причому функціональність виробу можлива при обмеженні основного (основних) параметра (параметрів) виробу або швидкості виконання дій.

За часом прояву:

Катастрофічна відмова – неочікувана (миттєва) повна відмова.

Деградуюча відмова – поступова в часі втрата працездатності.

Причини відмов поділяють на випадкові (непередбачувані) й систематичні.

До *випадкових* відносять:

– дефекти або різку зміну фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу;

– порушення режимів виконання технологічних операцій (перевантаження, збільшення швидкостей понад технічно допустимі);

– помилки в обслуговуванні машини тощо.

Систематичні причини – це закономірне накопичення пошкоджень внаслідок:

– зношування поверхонь контактуючих деталей і втоми матеріалів;

– корозії;

– старіння;

– теплового і хімічного впливу середовища.

До найпоширеніших показників, які дають можливість визначення безвідмовної роботи, крім самої відмови, відносять: *інтенсивність відмов* $\lambda(t)$, *імовірність безвідмовної* роботи $R(t)$ та імовірність відмови $F(t)$[1].

Очевидно, що

$$F(t) + R(t) = 1. \tag{3.1.1}$$

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$: відношення кількості виробів, що відмовили в роботі за одиницю часу, до кількості виробів, працездатних на даний момент.

Примітка. Переважно оцінку λ(t), залежно від виробу і обсягу партії, проводять на десяток, сотню, тисячу або більше виробів.

Практично інтенсивність відмов визначається за формулою

$$\lambda(t + \Delta t) = \frac{\Delta N}{\Delta t \times N(t)} = \frac{1}{1 - Na/N0} \frac{\Delta(Na/N0)}{\Delta t}, \tag{3.1.2}$$

де N_0 – загальна кількість виробів; N_A – кількість виробів, які відмовили за час Δt; *N(t)* – кількість виробів, працездатних у момент часу t. При $\Delta t \to 0$ *і* $N_0 \to \infty$, з врахуванням $\lim N_A / N_0 = F(t)$, формула (3.1.2) запишеться:

$$\lambda(t) = \frac{1}{1 - F(t)} \frac{dF(t)}{\mathrm{dt}}. \tag{3.1.3}$$

Враховуючи рівність (3.1.1), очевидно, що

$$\lambda(t) = -\frac{1}{1 - R(t)} \frac{dR(t)}{\mathrm{dt}} = -\frac{d}{\mathrm{dt}} [lnR(t)].$$

Після деяких перетворень та наступного інтегрування можна показати, що $R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right]$. При $\lambda(t) = const$ буде:

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \tag{3.1.4}$$

Імовірність безвідмовної роботи деталі машини визначається тим, що в межах заданого напрацювання (часу) не станеться відмова машини (деталі).

Якщо впродовж часу t з N_0 кількості однакових машин (деталей), які працюють в ідентичних умовах, відмовило N_A машин (деталей), то імовірність безвідмовної роботи, що вочевидь узгоджується з формулою (3.1.1), така:

$$R(t) = \frac{N_0 - N_A}{N_0} = 1 - \frac{N_A}{N_0}. \quad (3.1.5)$$

Нехай виробнича машина складається із n-з'єднаних елементів (механізмів, деталей), відмови яких незалежні і спричиняють відмову машини в цілому. В такому разі ймовірність безвідмовної роботи машини $R_м$ дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи i-елементів:

$$R_м = R_1(t)R_2(t) \dots R_n(t). \quad (3.1.6)$$

Якщо $R_1(t) = R_2(t) = R_n(t)$, то $R_м = R_i^n(t)$.

Наприклад, коли система складається з 10-ти елементів, а ймовірність безвідмовної роботи кожного із них складає 0,9, то загальна ймовірність $0{,}9^{IO} = 0{,}35$. Густина ймовірності відмови f, або ж розподіл цієї густини, визначатиметься так:

$$f(t) = dF(t)/d(t). \quad (3.1.7)$$

Тоді величина $f(t)d(t) = dF(t) = F(t + dt) - F(t)$ означає ймовірність появи відмови в інтервалі $(t, t + dt)$.

Довговічність машини – властивість зберігати працездатність до граничного стану з необхідними перервами для технічного обслуговування і ремонтів.

Граничний стан визначається неможливістю подальшої експлуатації машини з причини недопустимого зниження ефективності або вимогами техніки безпеки.

Показниками довговічності є технічний ресурс і термін служби.

Технічний ресурс – напрацювання виробу від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до граничного стану.

Ресурс вимірюють в одиницях роботи (в годинах), довжини шляху (кілометрах), в одиницях випуску продукції.

Призначений ресурс – напрацювання виробу, при досягненні якого експлуатація припиняється незалежно від технічного стану (наприклад, авіаційні двигуни).

Термін служби – календарна тривалість експлуатації машини до моменту виникнення граничного стану. Виражається в роках.

Для деталей машин як *критерій довговічності* використовують технічний ресурс. Довговічність машини великою мірою визначається довговічністю окремих деталей, яка залежить від їх міцності, жорсткості та стійкості проти спрацювання.

Заходи щодо підвищення довговічності машин можна розділити на три групи:

– конструктивні;
– технологічні;
– експлуатаційні.

Конструктивні заходи:

- створення раціональної конструкції з однаковою міцністю всіх елементів;
- обґрунтований добір матеріалів і їх зміцнення;
- впровадження в конструкцію саморегулювальних та запобіжних елементів та пристроїв;
- точні силові розрахунки та розрахунки на жорсткість і міцність;
- правильне використання допусків і посадок;
- урахування динамічних явищ, застосування пристроїв гасіння коливань і віброзахисту;
- застосування конструкцій агрегатної, блокової будови тощо.

Помилки в конструкції машини можуть викликати граничний стан на самому початку експлуатації. Правильно спроєктована машина має надійно працювати протягом призначеного терміну функціонування.

Технологічні заходи:

- добір прогресивних технологічних процесів механічної обробки деталей;
- застосування сучасних термічних і хіміко-термічних методів зміцнення деталей;
- використання прогресивних методів складання і контролю.

Експлуатаційні заходи:

- дотримування технологічних режимів та умов експлуатації машин;
- дотримування технічних вимог до технічного обслуговування;
- своєчасні діагностика, профілактика та ремонт машин.

Ремонтопридатність – пристосованість машини до попередження, виявлення й усунення причин виникнення відмов шляхом проведення технічного обслуговування і ремонту. Для оцінки ремонтопридатності використовують такі показники: питомі простої, коефіцієнти доступності, коефіцієнт легкості знімання.

Питомі *простої* визначаються за формулою:

$$K_n = \frac{T_{то}+T_р}{T_{\text{ц}}}, \tag{3.1.8}$$

де $T_{то}$ і $T_р$ – часи, відповідно, сумарних простоїв на всіх видах технічного обслуговування і ремонту за ремонтний цикл машини $T_ц$.

Коефіцієнт *доступності* визначається так:

$$K_{\text{д}} = I - \frac{T_{\text{дод}}}{T_{\text{дод}}+T_{\text{осн}}}, \tag{3.1.9}$$

де $T_{дод}$ й $T_{осн}$ – трудомісткість додаткових і основних робіт, пов'язаних з виконанням технічного обслуговування або ремонту.

Коефіцієнт *легкості знімання* обчислюється як

$$K_{\text{дз}} = 1 - \frac{T_{\text{дмн}}}{T_{\text{дмф}}}, \tag{3.1.10}$$

де $T_{дмн}$ – трудомісткість демонтажно-монтажних робіт за нормою; $T_{дмф}$ – трудомісткість демонтажно-монтажних робіт фактична (у конкретних умовах роботи).

Збереженість – властивість машини зберігати експлуатаційні показники безвідмовності, довговічності й ремонтопридатності після зберігання і транспортування. Практична роль цієї властивості особливо велика *для приладів*. Так, за американськими даними, під час Другої світової війни майже 50% радіоелектронного устаткування для воєнних потреб і запасних частин до нього вийшло з ладу в процесі зберігання. Показником збереженості може служити середній термін служби.

3.1.4. Причини зміни технічного стану устаткування в процесі роботи

Під *технічним станом* устаткування розуміють значення фактичних показників експлуатаційних властивостей машини. Частина показників експлуатаційних властивостей машини, наприклад, габаритні розміри, маса тощо, залишаються практично незмінними протягом усього періоду експлуатації. Але показники більшості властивостей, які визначають якість машини, зокрема економічність, продуктивність, безвідмовність тощо, змінюються в процесі роботи машини.

Основними причинами зміни технічного стану деталей і машини є:

- пластичні деформації;
- руйнування стомлювання;
- старіння під дією фізико-хімічних змін матеріалів;
- зношування.

Знання основних причин зміни технічного стану важливе як для вдосконалення конструкції машини, так і для вибору найбільш ефективних заходів щодо запобігання відмов при експлуатації.

Пластичні деформації і руйнування. Такі пошкодження пов'язані з досягненням або перевищенням меж текучості в'язких матеріалів (сталь), або міцності для крихких (чавун). Взагалі, цей вид руйнування є наслідком або помилок при розрахунках, або порушення правил експлуатації (перевантаження, перевищення режимів роботи). Часом вони є результатом механічного зношування, що супроводжується зменшенням геометричних розмірів і скороченням запасів міцності.

Руйнування стомлювання. Цей вид руйнування виникає при циклічному прикладанні навантаження, яке перевищує межу втоми матеріалу деталей. При цьому відбувається поступове накопичення і зростання тріщин, які приводять при певній кількості циклів до втомного руйнування деталей. Воно спостерігається за екстремальних умов експлуатації, наприклад, шийок циліндрів друкарського апарата при перевищенні тисків у зонах контакту.

Старіння. Показники технічного стану деталей і матеріалів змінюються під дією зовнішнього середовища. Так, гумові й поліуретанові вироби втрачають міцність і еластичність в результаті окислення, хімічної дії миючих речовин, сонячного випромінювання й вологості. При експлуатації властивості мастильних матеріалів погіршуються в результаті накопичення в них продуктів зношування (коксування мастила), зміни в'язкості й втрати властивостей

присадок. Деталі й матеріали змінюються не тільки при їх експлуатації, але й при зберіганні. Знижується міцність і еластичність гумових і поліуретанових виробів, в змащувальних матеріалах і рідинах відбуваються процеси окислення.

Зношування деталей. Процес зношування деталей виникає під дією тертя, яке залежить від матеріалу й якості оброблення поверхні, змащування, навантаження, швидкості відносного переміщення деталей, теплового режиму роботи спряження, а також внаслідок хімічної дії агресивних чинників.

Зношування – це процес руйнування відокремленням матеріалу з поверхні деталі, результатом якого є поступова зміна розмірів і форми деталей.

Знос – це результат зношування, який визначається в установлених одиницях (наприклад, мкм/км, мкм/рік).

Розділяють абразивне зношування, втомне зношування, окисне зношування, а також зношування при заїданні й фретингу.

Абразивне зношування є наслідком ріжучої або дряпучої дії твердих частинок, які знаходяться між поверхнями тертя. Такі частинки можуть потрапляти ззовні у вигляді пилюки або абразивних зерен, ними можуть стати також самі продукти зношування, які відокремилися від поверхонь тертя. Абразивне зношування відбувається найчастіше в парах ковзання.

Втомне зношування проявляється в тому, що частинки матеріалу в результаті тертя кочення і циклічного навантаження відокремлюються від поверхні.

Зношування при заїданні відбувається в результаті зчіплювання, глибинного виривання матеріалу, перенесення його з однієї поверхні на іншу. Воно призводить до задирів, заклинювання й руйнування механізмів. Таке зношування зумовлюється наявністю місцевих контактів між поверхнями тертя, на яких внаслідок великих навантажень і швидкостей відбувається розрив змащувальної плівки, сильне нагрівання й «зварювання» частинок металу. Заїдання відбувається в сильно навантажених опорах ковзання в тих же шийках циліндрів друкарського апарата при недостатньому змащуванні.

Окисне зношування відбувається в результаті взаємодії механічного зношування і агресивної дії середовища, під дією якого на поверхні тертя утворюються плівки окислів, котрі знімаються при механічному терті, а оголені поверхні знову окислюються. Відбувається при нормальних і підвищених температурах в умовах сухого тертя або при недостатньому змащуванні.

Зношування при фретингу – це механічне зношування деталей під час коливних переміщень щільно контактуючих поверхонь у результаті вібрації або періодичних деформацій елементів конструкції. При цьому на поверхнях взаємного контакту утворюються невеличкі заглиблення, вибоїни, а продукти корозії проявляються у вигляді нальоту, порошку. Таке зношування спостерігається на поверхнях валів і напресованих на них дисках, кулачках, зубчастих колесах, кільцях підшипників кочення, на поверхнях шпонок і їх пазів, на опорних поверхнях пружин.

3.1.5. Причини відмов

Причини зміни стану значною мірою пов'язані з особливостями дії різних енергетичних факторів. Найбільш загальними результатами дії цих факторів є зношування і старіння. Під їх впливом відбувається поступова зміна форми поверхонь окремих деталей. Останні спрацьовуються, змінюється характер спряжень, точність і плавність їх роботи. У виробах електроустаткування змінюється, наприклад, надійність з'єднань, надійність та міцність ізоляції. Зношування і старіння вважаються найбільш типовими причинами зміни технічного стану і пов'язаних із цими змінами відмов.

На відміну від поступової зміни стану, раптова зміна відбувається в результаті імпульсної зміни навантаження, впливу прихованих (не виявлених вчасно) дефектів. Відповідно до зміни технічного стану виникають дві групи відмов.

Перша група – відмови, які є наслідком конструктивних недоліків машини, технології її виготовлення, помилок в експлуатаційній документації. Відмови цієї групи повторюються для всієї партії виробів даної моделі. У зв'язку з цим обстеження хоча б одного екземпляра може дати необхідну інформацію для усунення причин таких відмов у решті виробів; при їх виявленні на окремих виробах можуть прийматися обґрунтовані рішення щодо проведення доробок на решті виробів з цієї моделі, або ж проведення інших заходів, що виключають появу схожих відмов.

Друга група – відмови, причинами яких є непостійні фактори виробництва, випадкове несприятливе поєднання режимів роботи або умов експлуатації, випадкові поєднання відхилень параметрів деталей в межах встановлених допусків тощо. Ці відмови випадкові, вони не повторюються для різних екземплярів одного типу, тому їх виявлення на довільній окремій машині не дає підстав робити висновки про ненадійність решти машин цього типу. Для підвищення рівня безвідмовності при наявності відмов другої групи необхідно встановити статистичні закономірності їх розподілу.

3.2. Забезпечення роботи приладів (апаратів)

[1, 3, 12, 16, 18, 19]

Суть цих функцій така:

1. Забезпечення *метрологічної єдності* вимірювальних величин.

2. Забезпечення *енергоживлення*: блоки живлення, стабілізація електричних величин, перетворення частоти.

3. Забезпечення *механічних переміщень*.

4. Забезпечення *внутрішньої орієнтації* елементної бази та *позиціювання* приладу у просторі.

5. *Управління* роботою приладів.

3.2.1. Забезпечення метрологічної єдності вимірювальних величин

[1,3, 12, 18]

Вимірювання – знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціально призначених технічних засобів у термінах загально прийнятої одиниці фізичної величини.

Основне рівняння вимірювання має вигляд:

$$Q = qU\ , \qquad (3.2.1)$$

де Q – значення фізичної величини; q – числове значення фізичної величини у прийнятих одиницях; U – одиниця фізичної величини.

Уніфікація одиниць фізичних величин забезпечується використанням *Міжнародної системи одиниць СІ.*

Принцип вимірювання – фізичне явище, що лежить в основі вимірювання. Наприклад, для вимірювання температури використовується зміна об'єму речовини у рідкому стані, зміна довжини дроту, зміна яскравості при нагріванні та ін.

Метод вимірювання – спосіб дії вимірювального пристрою на фізичне поле, що підлягає вимірюванню: аналоговий чи цифровий, прямий або побічний.

Показанням називають значення вимірювальної величини, яке визначається по відліковому пристрою і означене у встановлених одиницях цієї величини.

Метрологічна єдність вимірювань – стан технічного засобу вимірювань, який забезпечує зчитування результатів вимірювань відповідно до ваги фізичної величини у термінах *Міжнародної системи одиниць СІ.*

Для забезпечення метрологічної єдності вимірів (*МЄВ*) розрізняють такі принципи (способи) побудови функціональної структури:

1. Принцип послідовної структури.
2. Принцип паралельної структури.
3. Компенсаційний принцип – метод урівноваженого перетворення.

Розглянемо їх.

1.2.1.1. Принцип послідовної структури (рис. 3.2.1)

Розрізняємо два варіанти структурних схем:

а) прямі вимірювання: відлікова система приладу квантується у одиницях міри фізичної величини на рівні зчитування інформації (рис. 3.2.1 *а*);

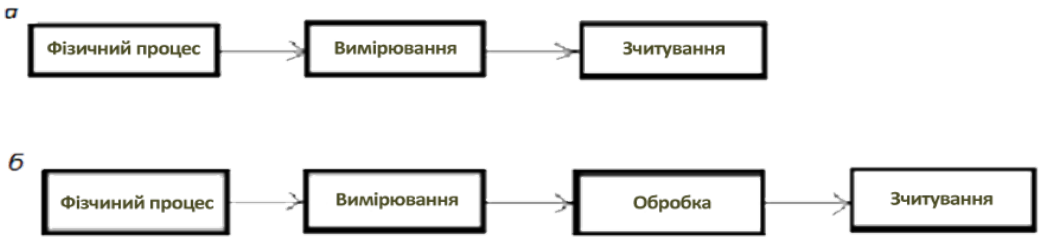


Рис. 3.2.1. Структурні схеми послідовного принципу забезпечення метрологічної єдності вимірювань (МЄВ): *а* – прямі вимірювання; *б* – побічні вимірювання

б) побічні вимірювання: відлікова система приладу розрахована у одиницях міри фізичної величини відповідно до математичної або графічної залежності

поміж цією величиною та фізичним полем, що представляє вимірювальну фізичну величину (рис. 3.2.1 *б*).

Метод *прямого вимірювання* полягає в тому, що шукане вимірюване значення фізичної величини знаходиться безпосереднім порівнянням цієї величини зі зразковою мірою. До прикладу, вимірювання ваги тіла здійснюється порівнянням з вагою тарованих гирь як мір ваги (рис. 3.2.2 *а*).

До прямих методів можна віднести всі вимірювальні засоби з безпосереднім відліком результатів за шкалою, яка проградуйована за зразковими мірами, як це реалізовано у схемі рис. 3.2.2 *б*.

Тут здійснюється порівняння переміщення в полі земного тяжіння вимірювального тягаря з пружною протидією (розтягом) циліндричної пружини.

Ще один приклад – показання термометра «порівнюють» вимірювальну температуру з температурою, указаною на шкалі при зразковому градуюванні.

До прямих методів можна віднести всі вимірювальні засоби з безпосереднім відліком результатів за шкалою, яка проградуйована за зразковими мірами, як це реалізовано у схемі рис. 3.2.2 *б*.

Тут здійснюється порівняння переміщення в полі земного тяжіння вимірювального тягаря з пружною протидією (розтягом) циліндричної пружини.

Ще один приклад – показання термометра «порівнюють» вимірювальну температуру з температурою, указаною на шкалі при зразковому градуюванні.

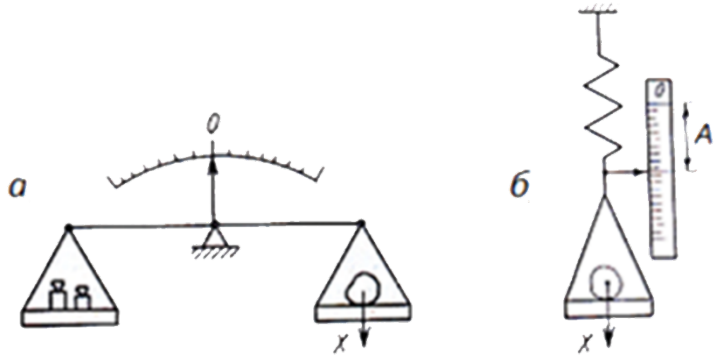


Рис. 3.2.2. Прямі вимірювання тягарю за послідовним принципом забезпечення МЄВ:
а – вимірювальна величина безпосередньо порівнюється з мірою за компенсаційним принципом; *б* – вимірювальна величина зчитується за деякою шкалою, яка попередньо проградуйована за зразковими мірами.

При *побічних вимірюваннях* використовуються математичні залежності між вимірювальною фізичною величиною та фізичним полем, що репрезентує цю фізичну величину. Прикладом побічних вимірювань є вимірювання електричних величин стрілочними електричними приладами (рис. 3.2.3), головним інструментом яких є поворотна провідна рамка, що обертається у зовнішньому магнітному полі. Внаслідок протікання електричного струму у котушці рамки індукується власне магнітне поле, яке вступає у взаємодію з зовнішнім магнітним полем – утворюється момент обертання рамки, оснащеної вказівною стрілкою.

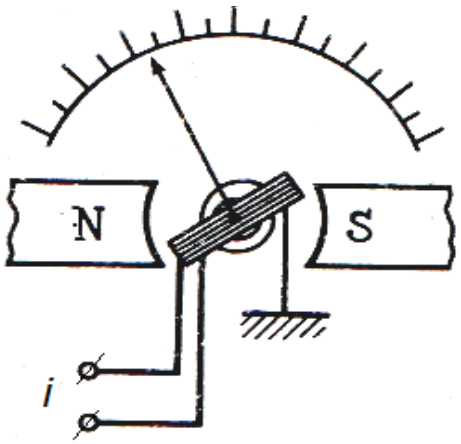


Рис. 3.2.3. Побічні вимірювання за послідовним принципом забезпечення МЄВ: класичний приклад конструктивних рішень вимірювання електричного струму

У подальшому відбувається порівняння вказаного моменту обертання з силовим моментом протидії *спіральної* пружини; цей момент і виступатиме як *зразкова міра* електричного струму.

Тут немає прямих вимірів струму, що протікає у котушці рамки; цей струм розраховується через магнітне поле за законом Ампера.

Зазначимо, що еталони похідних величин отримуються з основних, представлених системою СІ на підставі фундаментальних математичних співвідношень.

3.2.1.2. Принцип паралельної структури

Представлений двома схемами (рис. 3.2.4):

а – різницевий, *б* – диференційний методи.

За різницевим методом у компараторі здійснюється звірка та вимірювання перетвореного датчиком значення параметра фізичного поля з одиничною величиною того самого значення, що генерується мірою. Таким чином встановлюється співвідношення між цими величинами, яке обробляється та виводиться для прийняття рішень. Диференційний метод – метод, в якому на вимірювальну систему приладу діє різниця між вимірювальною величиною та величиною, яка генерується мірою. Отже, в цьому методі на компаратор приладу одночасно надходить як вимірювальна величина, так і величина, що генерується мірою, так званий опорний сигнал.

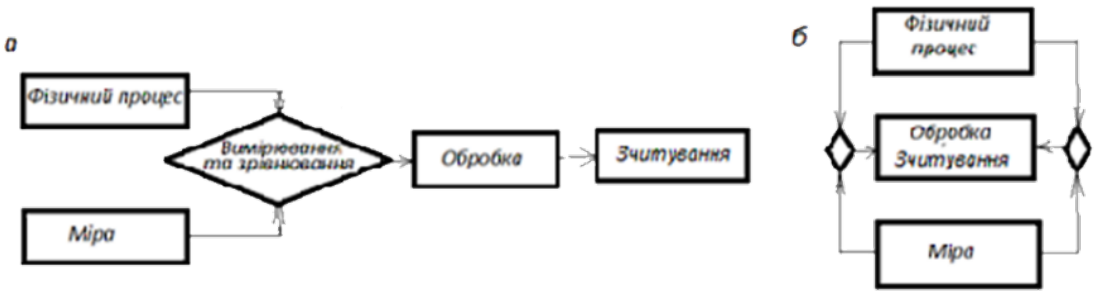


Рис. 3.2.4. Структурні паралельного принципу забезпечення метрологічної єдності вимірювань:

а – різницевий, *б* – диференційний методи;
◇ – компаратор: звірювання та вимірювання

Рис. 3.2.5 *а* демонструє конструктивне виконання датчика вимірювання абсолютного атмосферного тиску за різницевим методом, а рис. 3.2.5 *б* – диференційний метод вимірювання електричного потенціалу.

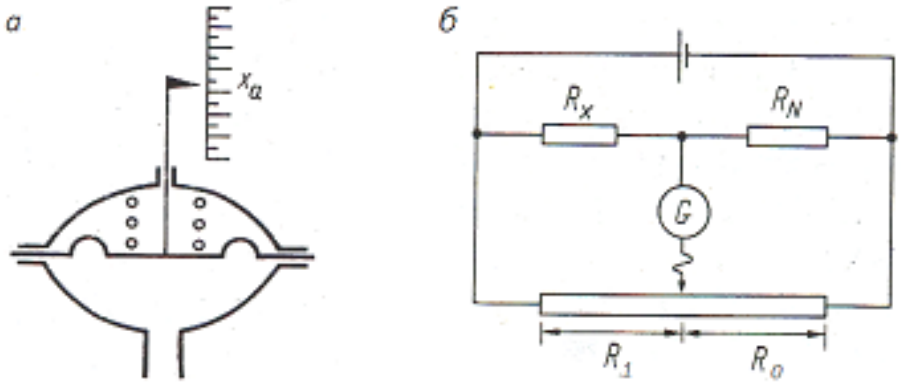


Рис. 3.2.5. Приклади конструктивного рішення за паралельним принципом забезпечення МЄВ:
а – датчик вимірювання абсолютного тиску за різницевим методом;
б – диференційний метод вимірювання електричного опору (міст Уїнстона)

3.2.1.3. Компенсаційний принцип: нуль-схема – метод урівноваженого перетворення

Компенсаційний принцип (рис. 3.2.6) полягає в тому, що вимірювальна величина компенсується величиною, яка генерується (відтворюється) мірою. Різниця цих величин підтримується незначною незалежно від розміру вимірювальної величини. Ось чому нуль-схема розрахована для роботи в околі нуля. Завдяки цьому досягається його висока чутливість та усувається нелінійність, яка особливо відчутна при значних відхиленнях вимірювальної величини від нульового значення. Інакше, нульовий метод – це метод порівняння з мірою, при якому результуючий ефект дії вхідної величини на прилад доводять до нуля; такі процедури виконує система порівняння, відома як компаратор – це вимірювальний прилад, призначений для порівняння вимірювальної величини з такою ж за родом, але значення якої чітко відоме. Переважно остання формується мірою відповідної фізичної величини.

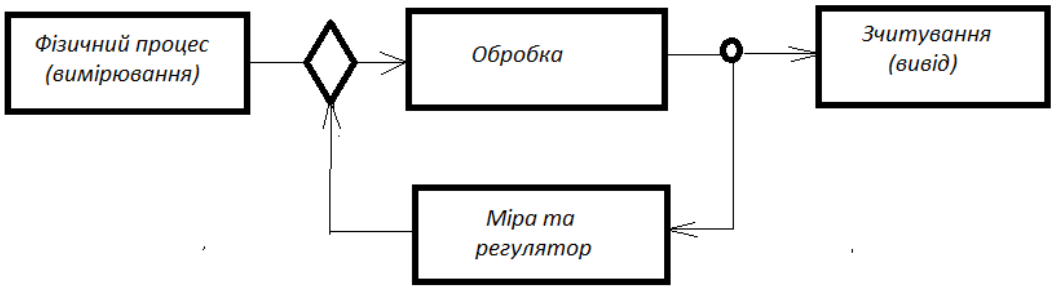


Рис. 3.2.6. Структурна схема компенсаційного принципу забезпечення метрологічної єдності вимірювань:

◇ – компаратор

Тут немає прямих вимірів струму, що протікає у котушці рамки; цей струм розраховується через магнітне поле за законом Ампера.

В механічних системах досягається урівноважений стан, завдяки якому силові дії на ланки приладу практично відсутні, що виключає зворотну дію на вхідну ланку; тому імовірність появи нерівноважного стану механізму приладу значно понижена.

При нульовому методі величина відхилення від нуля не має перевищувати зразкову величину, тобто деяку одиничну міру; ця обставина вимагає використання дуже високоякісної міри. Стан рівноваги визначається за положенням покажчика нуль-індикатора, який наразі має знаходитись на нульовій позначці.

Прикладом нульового методу є зважування тягаря G на плечових вагах (рис. 3.2.2 *а*), коли маса тягаря визначається масою гирь, які урівноважують дію тягаря на опору важелів плечей.

За цим методом отримуються високоточні результати, оскільки дозволяється компенсувати постійну складову сигналу і досліджувати лише змінну, яка містить основну інформацію про фізичний процес, що підлягає дослідженню.

Компенсаційний, диференційний та різницеві методи забезпечують вищу точність вимірювань, аніж методи безпосередньої оцінки. Проте мають обмежене використання, позаяк вимагають наявності великої кількості мір різного номіналу для отримання необхідних поєднань, щоб забезпечити достатній інтервал вимірювань. Використовується метод в метрологічних цілях, для повірки та атестації робочих засобів вимірювання.

3.2.2. Забезпечення енергоживлення: блоки живлення, стабілізація електричних величин, перетворення частоти

[22, 24, 44]

3.2.2.1. Передмова

Джерелом електроживлення називають функціональний блок, який перетворює електричні величини наявного джерела електричної енергії в такі величини, які необхідні конкретним споживачам в конкретних умовах експлуатації. В більшості випадків для роботи приладів і апаратів необхідні постійні струми (або напруги).

Як первинні джерела електроживлення приладів і апаратів використовуються:

1) стаціонарні зовнішні електричні мережі змінної напруги;
2) автономні електростанції у формі вітрогенератора, сонячної батареї або з приводом від двигуна внутрішнього згорання;
3) акумуляторні батареї – хімічні джерела.

Перетворення електрики здійснюється за посередництва *трансформації* (напруги, струму), *випростуванням*, *фільтрацією*, *стабілізацією*, *реверсуванням* – при наявності змінного струму. При наявності постійного струму його перетворення у змінний проводиться електронною схемотехнікою або ж за допомогою електричних машин (умформерів).

Джерела постійного струму використовуються для живлення засобів вимірювальної техніки. Джерела змінного струму застосовуються як для живлення вимірювальних схем і апаратури, так і для створення спеціальних випробувальних сигналів, які використовуються для регулювання та налаштування різноманітної електричної та електронної техніки.

3.2.2.2. Класифікація джерел живлення

1. *За родом вхідної електроенергії джерела*: змінна чи постійна напруга.

2. *За вихідною потужністю*: мікропотужні ($P_{вих} \leq 1$ Вт); малої потужності ($P_{вих} = 1…10$ Вт); середньої ($P_{вих} = 10…100$ Вт); підвищеної ($P_{вих} = 100…1000$ Вт); великої ($P_{вих} \geq 1000$ Вт). В окрему групу виділяють електроустановки з вихідною потужністю понад 1 КВт, які використовуються для живлення передавальних або приймальних пристроїв, іонних лазерів, технологічних установок.

3. *За родом вихідної електроенергії*: з вихідною напругою змінної синусоїдальної чи спеціальної форми (однофазного або багатофазного), з вихідною напругою постійного струму, комбіновані джерела (постійні та змінні напруги).

4. *За номінальним значенням вихідної напруги*: низька ($U_{вих} < 100$ В); підвищена ($U_{вих} = 100…1000$ В); висока ($U_{вих} > 1000$ В). Джерела живлення з рівнем напруги понад 1000 В прийнято називати високовольтними. У цих джерел робочі ланцюги знаходяться під потенціалом відносно «землі», який дорівнює робочій напрузі. В таких випадках джерела електроживлення називають високопотенціальними.

5. *За ступенем постійності вихідної напруги*: нестабілізовані та стабілізовані. Стабілізовані джерела живлення забезпечують постійність вихідної напруги при заданому рівні дії величин впливу (зміна вхідної напруги, вихідного струму, температури оточення, інше). В таких джерелах стабілізатор напруги може бути виконаний у вигляді окремого функціонального вузла.

6. *За допустимим відхиленням вихідної напруги від номіналу*: низька точність (> 5%); середня точність (1…5 %); висока точність (0,1…1 %); прецизійні (<0,1 %).

7. *За рівнем пульсації змінної складової вихідної напруги постійного струму*: малий рівень (<0,1 %); середній рівень (0,1…1%); високий рівень (>1%).

8. *За кількістю виходів*: один канал (один вихід) чи багатоканальні (два і більше).

9. *За способом стабілізації напруги*: неперервної чи імпульсної дії.

3.2.2.3. Характеристики джерел електроживлення

Характеристиками джерел електроживлення є: *вхідні величини* (діапазони вхідної напруги і частот змінного струму та його форми, при яких джерело живлення має зберігати працездатність) та *вихідні величини* (вихідна напруга, діапазон зміни струму, коефіцієнт стабілізації, форма вихідного сигналу – при потребі). До параметрів джерел відносять коефіцієнти трансформації по напрузі та струму, коефіцієнти стабілізації величин, коефіцієнт корисної дії, тривалість експлуатації без перерви (або з перервою). Переважно джерела живлення мають

кілька виходів з параметрами, що відрізняються. Більшість джерел живлення працюють від стаціонарних зовнішніх мереж. Розрізняють нестабілізовані та стабілізовані джерела живлення.

Основна структура джерел: трансформатор, випрямляч, фільтр згладжування, стабілізатор (при потребі).

Вхідний трансформатор виконує такі завдання:

– підвищення або пониження вхідної напруги до необхідного рівня;

– гальванічна розв'язка вхідних та вихідних мереж, що значно підвищує рівень безпеки експлуатації.

Складовими частинами трансформатора є: магнітопровід, первинна та вторинна обмотки. Якщо використати лише первинну обмотку з необхідними відводами, то такі перетворювачі називаються *автотрансформаторами* (*АТ*). Отже, у *АТ* відсутня гальванічна розв'язка, що робить їх небезпечними в експлуатації.

Принцип гальванічної розв'язки демонструється рис. 3.2.7. Трифазний генератор направляє у електричну мережу електроенергію. До однієї з фаз приєднаний трансформатор як споживач. Якщо в разі деяких обставин людина, яка ногами стоїть на землі, доторкнеться до одного із виводів вторинної обмотки, то струм через тіло не потече, оскільки немає дротового сполучення електричного кола – така ситуація і називається «гальванічна розв'язка».

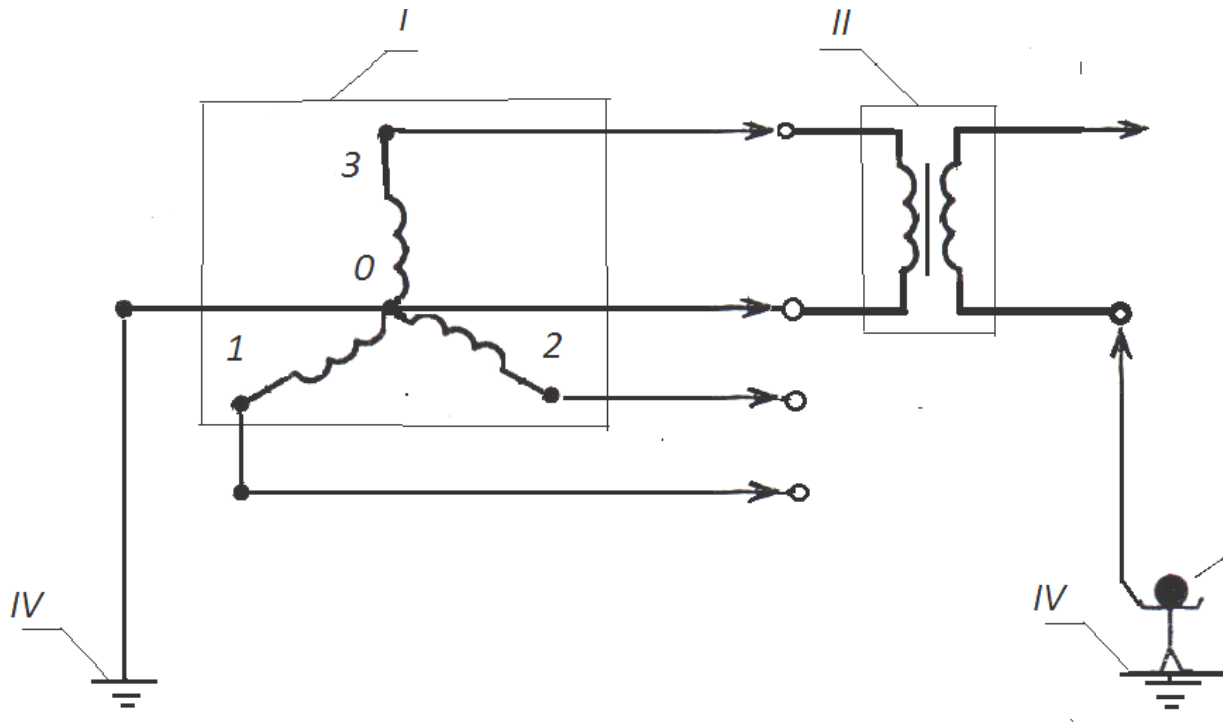


Рис. 3.2.7. Принцип гальванічної розв'язки з використанням трансформатора з магнітопроводом:

I – генератор трифазний; *II* – трансформатор однофазний;

III – людина; *IV* – заземлення

Переважно магнітопроводи трансформаторів виконуються з листової електротехнічної сталі, а в спеціальних випадках – зі спресованих до необхідної форми феритних порошків.

Відповідно до стандартів форма магнітопроводів О -, Ш - та П - подібна.

Обмотки виконуються зі спеціально ізольованих проводів – мідних або алюмінієвих. Відомі випадки використання срібла.

3.2.2.4. Випростування

В більшості випадків випростувачі включають в себе: *трансформатор, діоди та прасувальний фільтр.* Найбільш вживані схеми випростування показані на рис. 3.2.8.

Однонапівперіодна схема (рис. 3.2.8 *а*) зазвичай використовується при вихідній потужності до 10-ти Вт і в тих випадках, коли допустимі високі коефіцієнти пульсації. Перевага схеми – мінімальна кількість діодів, недолік – недостатнє використання потужності трансформатора та підмагнічування його магнітопроводу постійним струмом.

*Двонапівперіодна схема з виводом з середньої точки (*рис. *3.2.8 б) використовується зазвичай при вихідній потужності до 500 Вт. Переваги схеми – можливість приєднання збірок діодів з електрично сполученими катодами у схемах помноження напруги, а також можливість їх установки на один радіатор. Недолік – ускладнення конструкції трансформатора через наявність середньої точки вторинної обмотки та підвищеної зворотної напруги на діодах.*

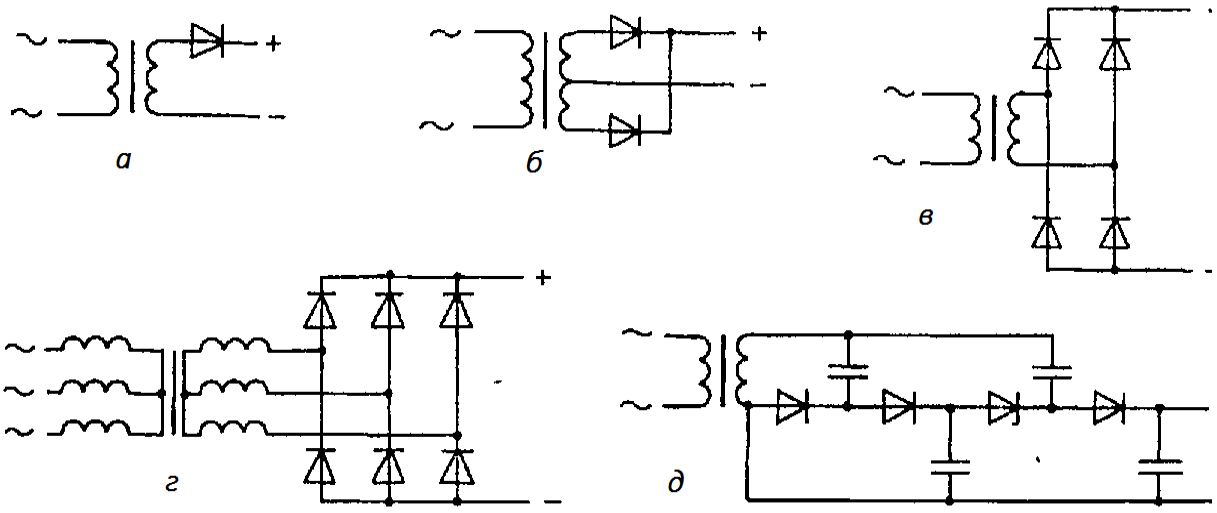


Рис. 3.2.8. Електричні схеми випростувачів:
а – однонапівперіодна; *б* – двонапівперіодна;
в – мостикова; *г* – мостикова для трифазних мереж;
д – діодно-конденсаторне помноження напруги.

Мостикова схема (рис. 3.2.8 *в*) набула широкого застосування, використовується в широкому діапазоні потужності, особливо понад 300 Вт. Інші переваги – підвищення частоти пульсації випрямленої напруги, низька

зворотна напруга на діодах, можливість використання без трансформатора. Місткова схема дуже ефективна для трифазних мереж (рис. 3.2.8 *г*). В пристроях високих напруг ефективна схема з діодно-конденсаторним помноженням (рис. 3.2.8 *д*). У цій схемі трансформатор є попередньою ланкою збільшення напруги, а також забезпечує гальванічну розв'язку.

3.2.2.5. Нестабілізовані джерела електроживлення

Умовні позначення нестабілізованого джерела постійного живлення показані на рис. 3.2.9 *а, б*; *а* – схема такого джерела (трансформатор, випрямляч і прасувальний фільтр), *б* – його умовне позначення.

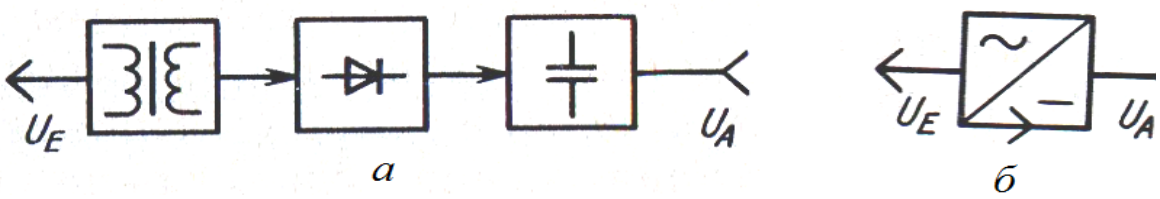


Рис. 3.2.9. Схема (а) та умовне позначення (б) нестабілізованого джерела постійної напруги

Прасувальні фільтри застосовуються для пониження змінної складової випрямленої напруги. Вони вмикаються між випрямлячем і навантаженням. Найбільшого поширення набули фільтри з двома компонентами, увімкненими за *Г*-подібною схемою (рис. 3.2.10).

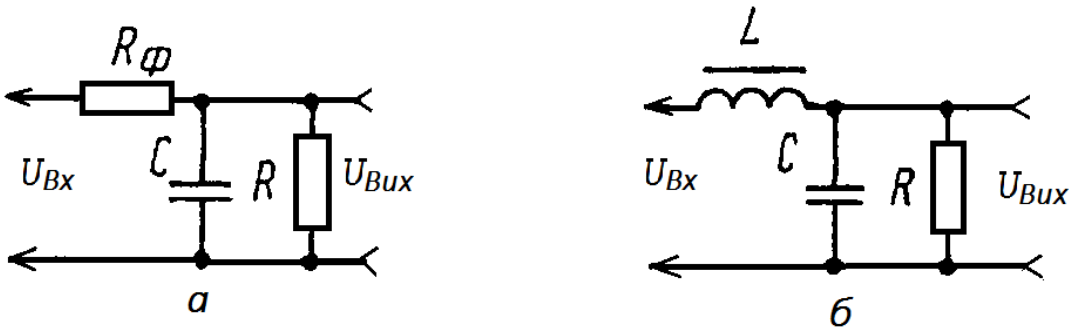


Рис. 3.2.10. Прасувальні фільтри

Послідовний компонент володіє великим опором змінному струмові, а паралельний – малим для цього ж струму. Як послідовний компонент використовується активний опір (схема *а*) або ж дросель (схема *б*). Основним показником фільтра є коефіцієнт згладжування пульсацій, який дорівнює відношенню коефіцієнта пульсацій $k_{\text{Пл.вх.}}$ на вході фільтра до коефіцієнта пульсацій $k_{\text{Пл.вих.}}$ на виході фільтра:

$$q = k_{\text{Пл.вх.}}/k_{\text{Пл.вих.}}. \qquad (3.2.2)$$

Тут $k_{\text{Пл.вх.}} = U_{\text{вх.змін.}}/U_{\text{вх.пост.}}$, $\quad k_{\text{Пл.вих.}} = U_{\text{вих.змін.}}/U_{\text{вих.пост.}}$,

де $U_{\text{вх.змін.}}$, $U_{\text{вх.пост.}}$ – змінна і постійна складова вхідної напруги фільтра; $U_{\text{вих.змін.}}$, $U_{\text{вих.пост.}}$ – змінна і постійна складова вихідної напруги.

Зазвичай *RC*-фільтр використовується у схемах з невеликими струмами навантаження, тобто з великим опором *R*. Цим схемам властиві великі втрати потужності постійного струму на R_F. При великих струмах навантаження, коли опір *R* малий, застосовують *LC*-фільтри.

Параметри елементів схем оцінюють так. Нехай $\omega_n = \omega_{\text{вх.}}$ – основна гармоніка частоти пульсацій, *m* – кількість фаз випрямляча, *k* – номер гармоніки вихідного сигналу (*k* = 1, 2, …).

Для схеми рис. 3.2.10 *а* опір резистора R_F встановлюється з умови мінімуму втрат потужності, ($R_F \ll R$), а ємність С має забезпечити необхідне згладжування першої гармоніки пульсації. Така вимога приводить до нерівності $\omega_{\text{П}} C R_F \gg 1$, за якою оцінюють величину ємності С.

Для схеми рис. 3.2.10 *б* ємність конденсатора встановлюється з умови $k\omega_{\text{П}} CR \gg 1$. Резонансна частота фільтра ω_F має бути значно меншою від частоти пульсації першої гармоніки вхідного сигналу $\omega_{\text{П}}$, тобто $\omega_F \ll \omega_{\text{П}}$. Використовуючи відоме співвідношення для частоти *LC*-фільтра $\omega_F = \sqrt{LC}$, визначають індуктивність дроселя.

3.2.2.6. Стабілізовані джерела живлення

Схема умовного зображення стабілізованого джерела постійної напруги показана на рис. 3.2.11.

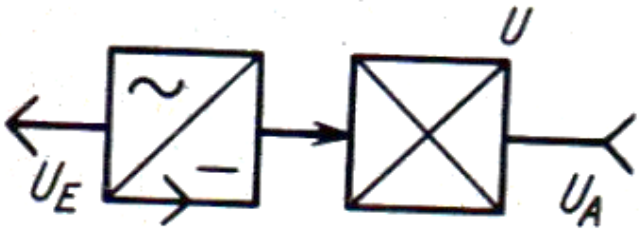


Рис. 3.2.11. Умовне позначення стабілізованого джерела постійної напруги

Розрізняють стабілізатори постійної напруги та системи неперервної та імпульсної дії. Перший тип на виході забезпечує постійну напругу, яка переважно дорівнює напрузі на вході або близька до вхідної. Другий тип передбачає принципову відмінність у напругах як щодо величини, так і щодо форми.

1. Використання нелінійного елемента (параметричні)

Такі стабілізатори використовуються при невеликих вихідних струмах, які змінюються в нешироких межах. Основна перевага – це проста конструкція (рис. 3.2.12), недолік – низький ККД (близько 0,5), великі відхилення напруги стабілізації та сильна залежність від температури.

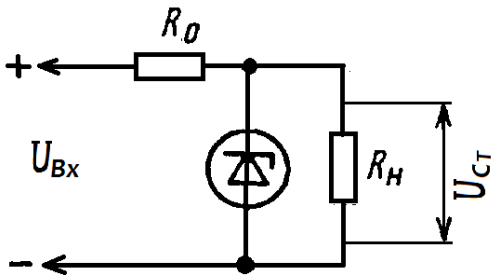


Рис. 3.2.12. Схема увімкнення стабілітрона

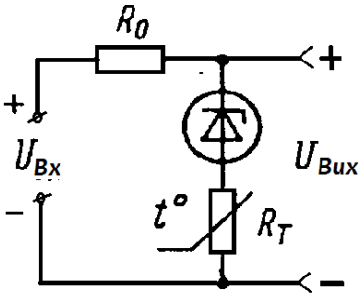


Рис. 3.2.13. Температурна компенсація з використанням термоопору

Ця залежність дещо усувається шляхом включення послідовно з показаним на схемі стабілітроном одного або кількох додаткових стабілітронів, або ж термоопору (рис. 3.2.13).

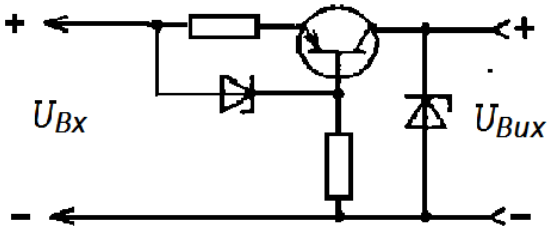


Рис. 3.2.14. Схема параметричного стабілізатора напруги з стабілізацією вхідного струму

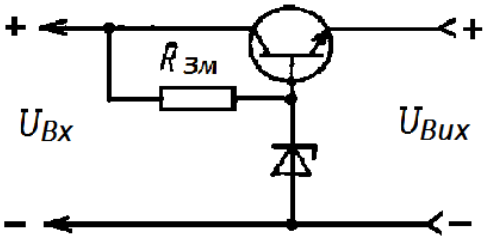


Рис. 3.2.15. Схема параметричного стабілізатора напруги з емітерним повторювачем

Відоме використання металооксидних варисторів, які встановлюються замість стабілітронів у малопотужних схемах.

При температурній компенсації коефіцієнт стабілізації зменшується в кілька разів. Його можна збільшити за рахунок підвищення вхідної напруги і опору обмежувального резистора, але це призводить до зменшення *ККД* стабілізатора. Підвищення коефіцієнта стабілізації без пониження *ККД* досягається використанням стабілізатора струму замість обмежувального резистора за схемою рис. 3.2.14. Така схема підвищує коефіцієнт стабілізації у 5…8 разів.

Для збільшення вихідної потужності стабілізатора використовується схема з емітерним повторенням (рис. 3.2.15). Коефіцієнт стабілізації залишається таким же, що й у попередній схемі. Вихідна напруга встановлюється напругою стабілітрона.

2. Стабілізація за допомогою регулятора (компенсаційне)

Цей тип стабілізаторів є пристроєм автоматичного регулювання вихідної величини. Він підтримує напругу навантаження в заданих межах при зміні вхідної напруги та вихідного струму. В порівнянні з параметричними стабілізаторами, компенсаційні відрізняються більшими вихідними струмами та коефіцієнтами стабілізації. До складу компенсаційного стабілізатора напруги переважно входять такі компоненти: регулювальний компонент, пристрій порівняння, підсилювач

постійного струму. Пристрій порівняння порівнює вихідну напругу джерела зі стандартною, формує різницю, яка підсилюється і керує регулювальною ланкою так, щоб ця різниця залишалась якомога постійнішою. Стандартну напругу, тобто опорне джерело, одержують за допомогою стабілітронів, які при підвищених вимогах виконуються як опорні елементи; при особливо високих вимогах стабільності використовуються так звані нормальні елементи. Регулюючий компонент *РК* вмикається послідовно (рис. 3.2.16, *а*) або паралельно навантаженню (рис. 3.2.16, *б*).

Переважно використовують схеми з послідовним увімкненням *РК* завдяки вищим *ККД* та коефіцієнтом стабілізації. Стабілізатори з паралельним увімкненням *РК* використовують для споживачів з можливими перевантаженнями або ж навіть при коротких замиканнях. Пристрій вимірювання *ПВ* виконується у вигляді подільника напруги, з якого знімається частина потенціалу і подається на підсилювач постійного струму (*ППС*), що далі порівнюється з опорною напругою.

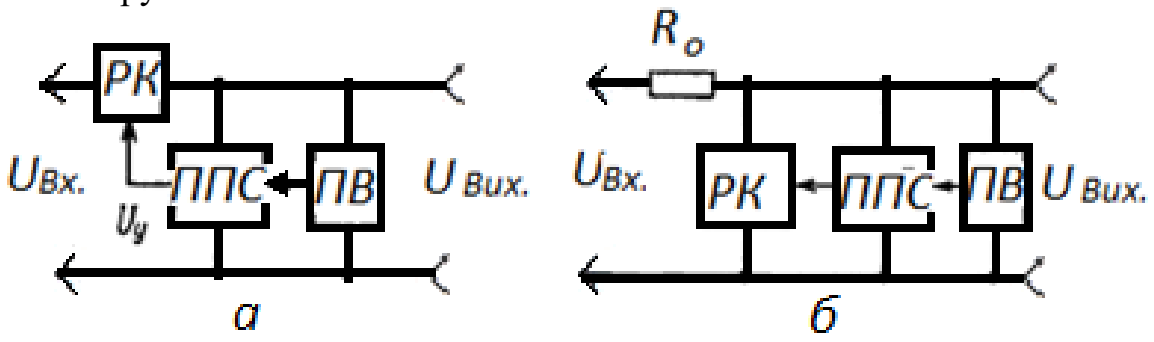


Рис. 3.2.16. Структурні схеми стабілізаторів напруги з послідовним (а) та паралельним (б) увімкненням регулювального компонента

Регулятор на *магнітних підсилювачах* (рис. 3.2.17) відносимо до схем з послідовним увімкненням. Складаються з котушок з феромагнітними магнітопроводами та діодів випрямлення. Нелінійні магнітні властивості магнітопроводу використовуються для регулювання струму та напруги в колі змінного струму. Внаслідок великої маси та нетехнологічності виготовлення котушок такі регулятори втратили застосування в порівнянні з напівпровідниковими регуляторами.

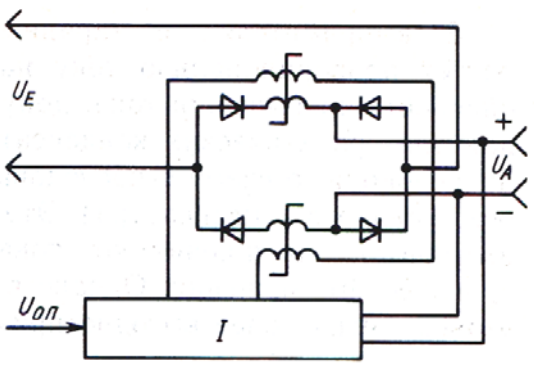


Рис. 3.2.17. Схема регулятора на магнітних підсилювачах:

I – порівняння та керування; $U_{оп}$ – опорний сигнал

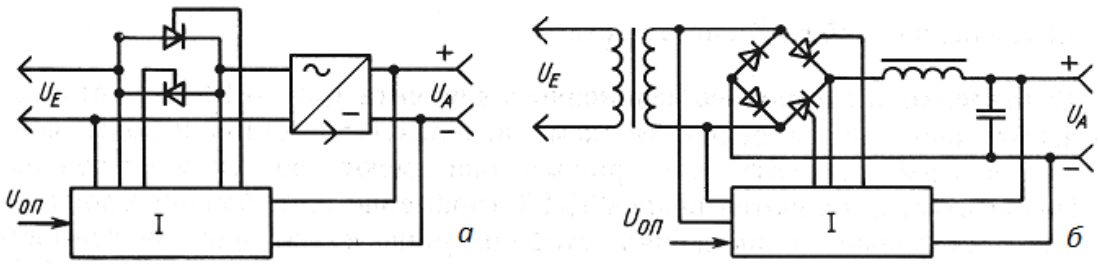


Рис. 3.2.18. Тиристорні регулятори постійної напруги з тиристором у первинному (а) та вторинному (б) контурах:
I – порівняння та керування; $U_{оп}$ – опорний сигнал

Тиристорні регулятори. На рис. 3.2.18 показані дві схеми з послідовним увімкненням регуляторів: схема (*а*) – у первинному контурі, схема (*б*) – у вторинному. Переваги тиристорних регуляторів – високий *ККД*, який забезпечується низькими втратами в ланці регулювання внаслідок наявності лише двох стійких станів тиристора: «закритий – відкритий». Недоліки – висока інерційність та утворення електромагнітних завад унаслідок стрибкоподібної зміни струмів при увімкненні. Ці регулятори використовуються при великій потужності споживача.

Транзисторні регулятори представлені схемами на рис. 3.2.19. Регулювальна ланка (транзистор) використовується як активний опір – неперервний регулятор, або ж як електронний ключ – релейний регулятор. У першій схемі (*а)* транзистор увімкнений послідовно навантаженню. Він виділяє різницю між постійною вихідною напругою та напругою живлення (вхідною). Через транзистор завжди тече сумарний струм навантаження, що створює велику потужність розсіювання. Ця обставина вимагає його охолодження (радіатор, термоелектрика та ін.). Для релейного регулятора (схеми *б, в*) необхідне імпульсне живлення бази транзистора, яке формується контуром «дросель – конденсатор – діод».

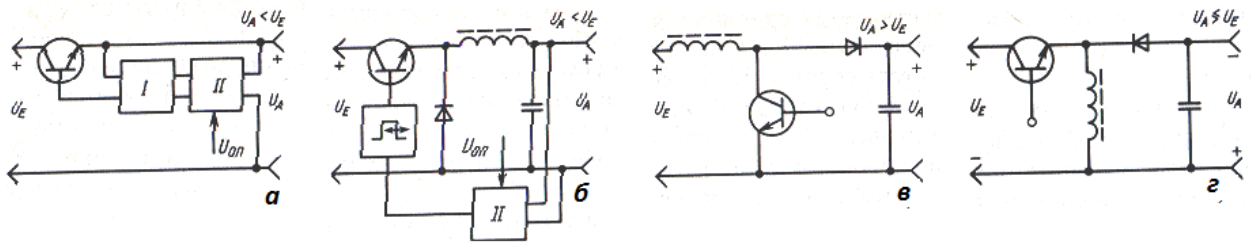


Рис. 3.2.19. Транзисторні регулятори постійної напруги:
а – неперервний; *б* – релейний з пониженням вхідної напруги;
в – з підвищеною вхідною напругою; *г* – релейний зі зміною полярності вихідної напруги; *I* – підсилення; *II* – порівняння

Регулювання напруги здійснюється зміною частоти перемикання при постійній тривалості увімкнення або зміною вказаної тривалості при постійній частоті перемикання. Другий метод знайшов широке застосування у регуляторах із вільними коливаннями при зміні частоти і тривалості імпульсів. Частота перемикання вище порогу чутності (не менше 16 кГц), тому акумулюючий дросель малогабаритний, а його магнітопровід виготовлений із феритів.

3.2.2.7. Джерела змінної напруги із живленням від промислової електромережі

Тут ми коротко розглянемо основну групу цих приладів – генератори електричних коливань. Розрізняють такі типи генераторів:

1) генератори низьких (інфранизьких) частот;
2) генератори звукових частот;
3) генератори високих та надвисоких частот.

Базова схема таких генераторів – рис. 3.2.20. Основним вузлом цих приладів є задаючий генератор (З.г.), який генерує необхідну форму сигналу. Далі йде підсилювач та деякий вихідний пристрій відповідно до призначення виробу.

Задаючий генератор. Перший і найбільш поширений принцип З.г. – це перенастроюваний коливний контур (індуктивність, ємність, опір), що завдяки електронній схемі формує коливний процес без затухання. Розрізняють *LC*-генератори, *RC*-генератори та генератори на битті. В генераторах *LC* частота генерованої напруги визначається індуктивністю і ємністю коливного контуру за формулою

$$f = {}^{1}\!/_{2\pi\sqrt{LC}}\sqrt{1-\frac{1}{Q^2}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (3.2.3)$$

(при високій добротності Q).

Частота коливань для *RC* – генератора

$$f = \frac{1}{2\pi RC}\,. \qquad (3.2.4)$$

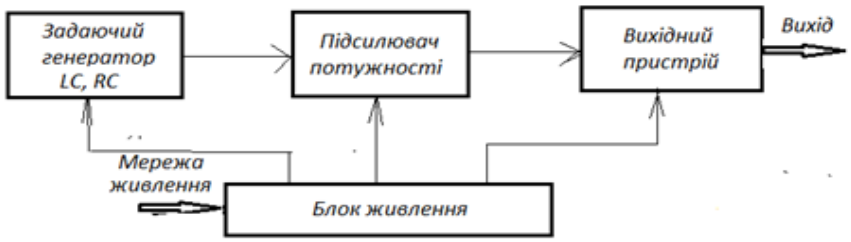


Рис. 3.2.20. Структурна схема RC, LC-генераторів

Задаючі генератори на биття замість одно блокового принципу оснащені двома генераторами, один з яких опорний з фіксованою стабільною частотою f_{on}, а інший – такий, що перестроюється (рис. 3.2.21), частота f_{np}.

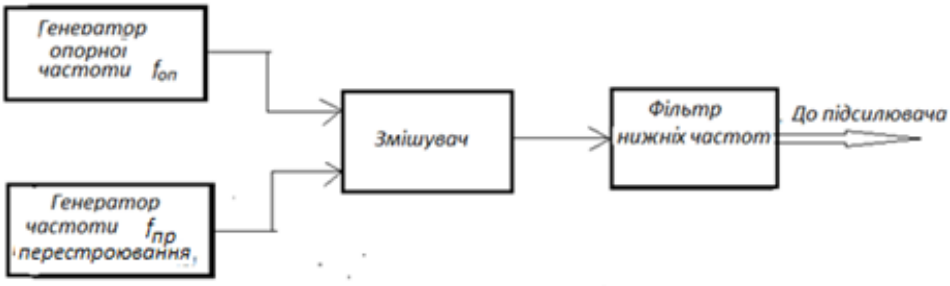


Рис. 3.2.21. Структурна схема задаючого генератора на явищі «биття»

Вироблені сигнали направляються у змішувач, у якому на виході створюються коливання різних частот, в тому числі і різницева, $\Delta f = f_{оп} - f_{пр}$. Ця різницева частота виділяється фільтром нижніх частот, підсилюється і надходить на вихід генератора. Такі генератори доволі складні у конструкції, володіють плавною та стабільною частотою, що перестроюється у широких межах. Головною ланкою опорного генератора переважно виступає *кварцовий* резонатор. У високоякісних низькочастотних генераторах знаходять застосування *камертонні* резонатори.

3.2.2.8. Джерела електроживлення з постійною вхідною напругою

Основне завдання таких джерел – перетворення постійної напруги в одну або декілька постійних або змінних напруг, переважно стабілізованих. У цих схемах вхідна постійна напруга періодично вмикається та вимикається в первинному колі трансформатора. В результаті таких перемикань з причини індукції у вторинному колі трансформатора виникає змінна напруга необхідної величини прямокутної форми, яка знову випрямляється або ж використовується як змінна. Найбільш вживані схеми показані на рис. 3.2.22.

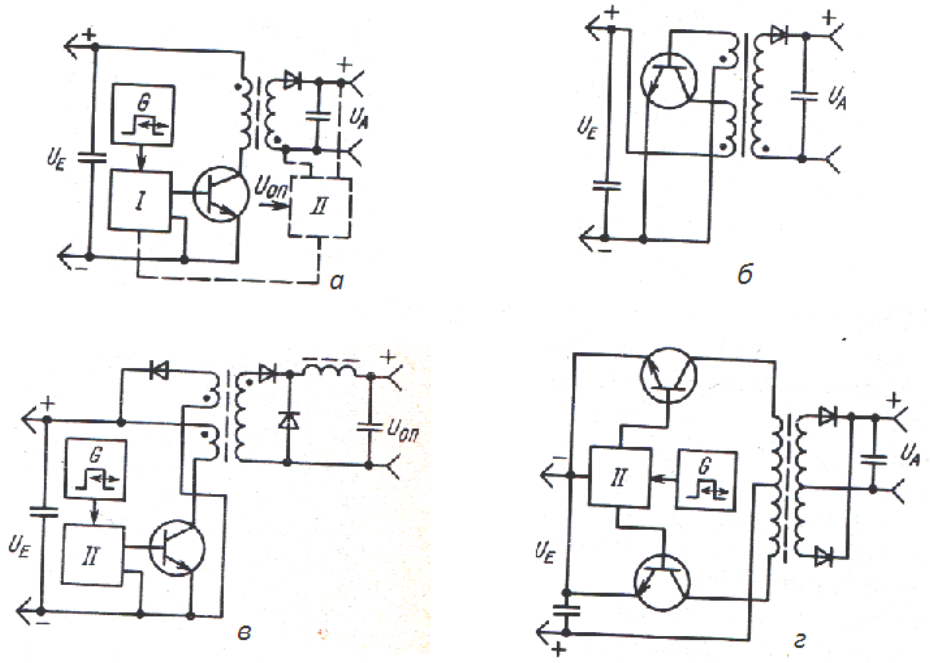


Рис. 3.2.22. Перетворювачі постійної напруги:
а – з транзистором у закритому стані та зовнішнім керуванні;
б – з транзистором *у* закритому стані, автоколивальний перетворювач;
в – з транзистором у відкритому стані; *г* – двотактовий перетворювач;
I – порівняння; II – керування

Сучасна напівпровідникова техніка дозволяє створювати такі перетворювачі від кількох ватів до кількох кіловатів при вхідних напругах від кількох вольтів до декількох сотень вольтів.

3.2.3. Забезпечення механічних переміщень [7, 21, 24, 48]

3.2.3.1. Механічні передачі (загальні питання)

У багатьох випадках прилади і апарати потребують механічної енергії для управління функціями та для виконавчих органів (апаратів). Окрім ручного, ця енергія продукується електромеханічно: електродвигунами, або електромагнітами, переважно з приводами, структурна схема якого подана на рис. 3.2.23.

Безпосереднє сполучення валу машини (робочого механізму) з валом електродвигуна спостерігається зрідка, оскільки кінематичні та динамічні параметри двигуна та виконавчого органу різні. Для їх узгодження використовуються так звані *передачі*, призначення яких – це транспортування та розподіл механічної енергії, перетворення однієї форми руху в інший (наприклад, обертового в лінійний), а також для забезпечення необхідних для роботи виконавчих органів кутових швидкостей і крутильних моментів.

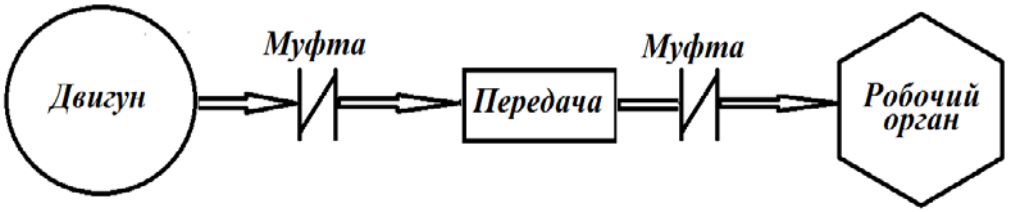


Рис. 3.2.23. Структурна схема машини:
Д – двигун; Пр. – передача; Ро. – робочий орган ; М – муфти

У схемі рис. 3.2.23 показані муфти як проміжні сполучні елементи, функції яких – приєднання та від'єднання основних частин машини до джерел руху.

Найбільш поширені механізми передач – зубчасті. Передачі обертового руху, які понижують частоту обертання, називають *редуктором*; ті, які підвищують, – *мультиплікаторами*.

3.2.3.2. Кінематика зубчатих передач

Основною кінематичною характеристикою передаточних механізмів, яка вказує на зміну руху від джерела до виконавчого органу, є передаточна функція – це відношення функцій переміщення вихідної та вхідної ланок. У разі незмінності в часі цих функцій відношення вироджується в параметр i_{1n} – передаточне відношення від входу *1* до виходу *n*.

Для зубчатих механізмів передаточне відношення запишеться так:

$$i_{1n} = \varphi_{\text{вих}}/\varphi_{\text{вх}} = \omega_{\text{вих}}/\omega_{\text{вх}} = n_{\text{вих}}/n_{\text{вх}}\ , \qquad (3.3.1)$$

де $\varphi_{вих}$, $\varphi_{вх}$ – переміщення (кути повороту); $\omega_{вих}$, $\omega_{вх}$ – кутові швидкості; $n_{вих}$, $n_{вх}$ – кількість обертів за одиницю часу вихідної та вхідної ланок.

Оскільки перетворення руху в кінематичних парах зубчатих механізмів (окрім хвильових) має лінійний характер, то легко показати, що

$$i_{1n} = i_{12} \times i_{23} \times i_{34} \times \cdot \ldots \cdot \times i_{n-1}, \qquad (3.3.2)$$

де $i_{k,k+1}$ – передаточне відношення двох спряжених зубчатих коліс. Нехай кількість зубців цих коліс z_k та z_{k+1}. Тоді передаточне відношення цієї пари буде таким:

$$i_{k,k+1} = \omega_{k+1}/\omega_k = -z_k/z_{k+1}. \quad (3.3.3)$$

Знак «мінус» вказує на те, що напрямки обертання спряжених коліс протилежні. Підставимо співвідношення (3.3.3) в (3.3.2). Отже,

$$i_{1n} = (-1)^n(z_1 \times z_3 \times \ldots \times z_{n-1}/z_2 \times z_4 \times \ldots \times z_n), \quad (3.3.4)$$

де n – кількість зачеплень. Бачимо, що в чисельнику представлені ведучі зубчаті колеса, а в знаменнику – ведені.

Розрахуємо передаточне відношення двоступеневого рядового механізму, кінематична схема якого подана на рис. 3.3.2 *а*. Нехай i_{12}, i_{23}, i_{34} – передаточні відношення між колесами 1-2, 2-3, 3-4. Згідно з формулою (3.2), передаточне відношення цієї передачі буде таким:

$$i_{1n} = i_{12} \times i_{23} \times i_{34}. \quad (3.3.5)$$

Але колеса 2-3 з'єднані між собою нерухомо, тобто вони обертаються з однаковою кутовою швидкістю; тоді $i_{23} = 1$. Отже, (3.3.5) можна записати:

$$i_{1n} = i_{12} \times i_{34} = (-1)^2 \cdot (z_1 \times z_3/z_2 \times z_4). \quad (3.3.6)$$

Уявімо, що схема рис. 3.8 *а* модифікована введенням додаткового колеса *A* з кількістю зубців z_A , яке одночасно різними зонами віночка входить у зачеплення з попереднім z_1 та наступним z_2 колесами.

Передаточне відношення цього механізму буде таким:

$$i_{15} = (-1)^3 \cdot (z_1 \times z_A \times z_3/z_A \times z_2 \times z_4). \quad (3.3.7)$$

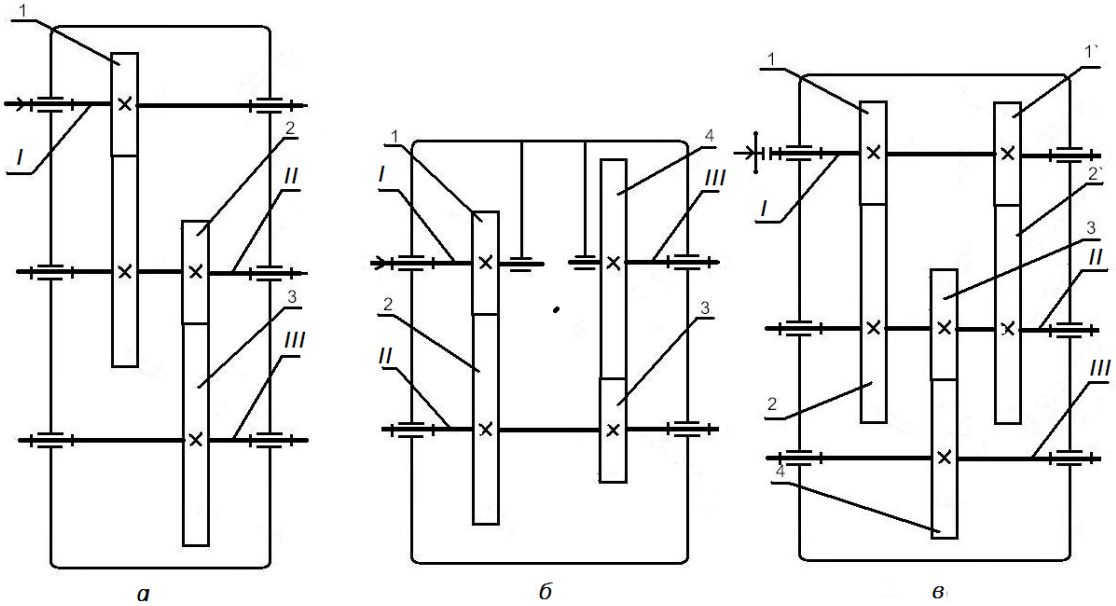


Рис. 3.2.24. Кінематичні схеми двоступеневих зубчатих механізмів:
а – розгорнута класична схема; *б* – компактна; *в* – схема з пасивними колесами 1', 2'

Бачимо, що z_A одночасно знаходиться як в чисельнику, так і знаменнику, отже, скоротиться. Таким чином, колесо *A* не буде впливати на абсолютну

величину передаточного відношення. Його наявність змінить лише знак i_{15}, так як число *(-1)* підноситься вже до третього ступеня (три зачеплення), а не до другого, як це було б при розрахунках схеми 3.3.2 *а*. Такі колеса мають назву пасивних, а з точки зору структури механізмів – пасивних ланок або надлишкових зв'язків.

Уведення до схеми механізмів пасивних ланок має метою:

– усунення неоднозначності руху механізму та забезпечення необхідного напрямку його орієнтації;

– розвантаження ланок механізму, підвищення стійкості та міцності системи.

Зробимо зауваження щодо оцінки величини обертового руху. У техніці для оцінки швидкості обертання здебільшого використовують не кутову швидкість *ω [рад/сек]*, а кількість обертів за хвилину, тобто *n [хв$^{-1}$]*.

Зв'язок між цими величинами встановлюється так. Якщо $\omega = d\varphi/dt \approx \Delta\varphi/\Delta t$, то при $\Delta t = 1\Delta\varphi$ буде кут повороту за цей час. Очевидно, що кутова швидкість, тобто кут повороту в радіанах за секунду, буде складати добуток величини кута в одному оберті (2π *рад*) на кількість обертів вала *n* за секунду.

Якщо оберти подані за одну хвилину, то

$$\omega_{\text{рад}} = (2\pi/60)n_{\text{хв}}. \qquad (3.3.8)$$

Одиниці вимірювань динамічних параметрів у різних системах такі.

Потужність в системі *СІ – [Вт]* або *[кВт]* (*1 Вт = 1 Дж/с = 1 Н·м/с*). Обертовий момент вимірюють в *[Н·м]*. У довідниках можна зустріти використання застарілих систем. Так, *1 Вт = 0,102 кгс·м/с; 1 к. с. = 735,3 Вт* (к.с. – кінська сила)

3.2.3.3. Елементи динаміки механічних передач

Відомо, що при обертовому русі елементарна робота $dA = M \cdot d\varphi$, а потужність

$$N = dA/dt = M\,(d\varphi/dt) = M\,\omega. \qquad (3.3.9)$$

Нехай на вхідний вал передаточного механізму від двигуна підводиться рух з параметрами $N_{вх}$, $M_{вх}$, $\omega_{вх}$. Внаслідок редукції швидкість обертання вихідного вала буде $\omega_{вих}$. Нехтуючи тертям у кінематичних парах механізму, на підставі закону збереження енергії, можна записати: $N_{\text{вих}} \approx N_{\text{вх}}$.

Використавши формулу (3.3.9), отримаємо

$$M_{\text{вих}}\,\omega_{\text{вих}} \approx M_{\text{вх}}\,\omega_{\text{вх}}. \qquad (3.3.10)$$

Із формули (3.3.10) випливає, що зі зменшенням кутової швидкості на вихідному валу передаточного механізму зростає його обертовий момент і навпаки – із збільшенням кутової швидкості на виході зменшується момент обертання, що прикладається до виконавчого органу.

3.2.3.4. Електродвигуни [24; 51(Ч.1)]

Синоніми: електричні машини, електромеханічні перетворювачі електричної енергії $W_{\text{ел}}$ в механічну$W_{\text{мех}}$.

Відношення цих енергій визначає ККД двигуна:

$$\eta = W_{\text{мех}}/W_{\text{ел}}.$$

Механічна енергія, яка віддається двигуном при обертовому русі, буде:

$$W_{\text{мех}} = \varphi_{\Sigma} M_{\text{вал}},$$

де φ_{Σ} – повний кут обертання ротора двигуна за час спостереження, $M_{\text{вал}}$ – спожитий на валу момент сили за цей час (стаціонарний режим).

Споживана потужність буде:

$$P_{\text{мех}} = {}^{dW_{\text{мех}}}/_{dt} = \frac{d\varphi_{\Sigma}}{dt} M_{\text{вал}}.$$

У залежності від виду руху електродвигуни діляться на обертові та лінійні. За характером руху їх класифікують на перетворювачі з неперервним або дискретним рухом. Двигуни з дискретним рухом називають *кроковими* двигунами. Електродвигуни з неперервним рухом: на змінному або постійному струмі, однофазні або трифазні, синхронні або асинхронні.

Механічні характеристики основних електричних машин показані на рис. 3.2.25.

На рисунках відображені залежності кутової швидкості (частоти обертання) $\omega = {}^{d\varphi}/_{dt}$ від споживаного моменту сили на валу. Найбільш показова механічна характеристика асинхронного двигуна (3.3.3, *в*). Тут спостерігаємо такі характерні точки та значення. M_{st}– стартове значення моменту сили (пускове), яке потребує імпульсу струму; в цей період увімкнення двигуна на робоче навантаження недопустиме. Зі збільшенням частоти обертання, як бачимо із ходу залежності, момент сили, що розвивається на валу, зростає до критичної величини ($M_{\text{крит}}$). З подальшим зростанням частоти обертання момент сили спадає лінійно; номінальні параметри електродвигуна $\omega_{\text{ном}}, M_{\text{ном}}$набувають проміжних величин. Максимальне значення обертання ω_0 двигуна буде при відсутності зовнішнього навантаження $M = 0$ на валу.

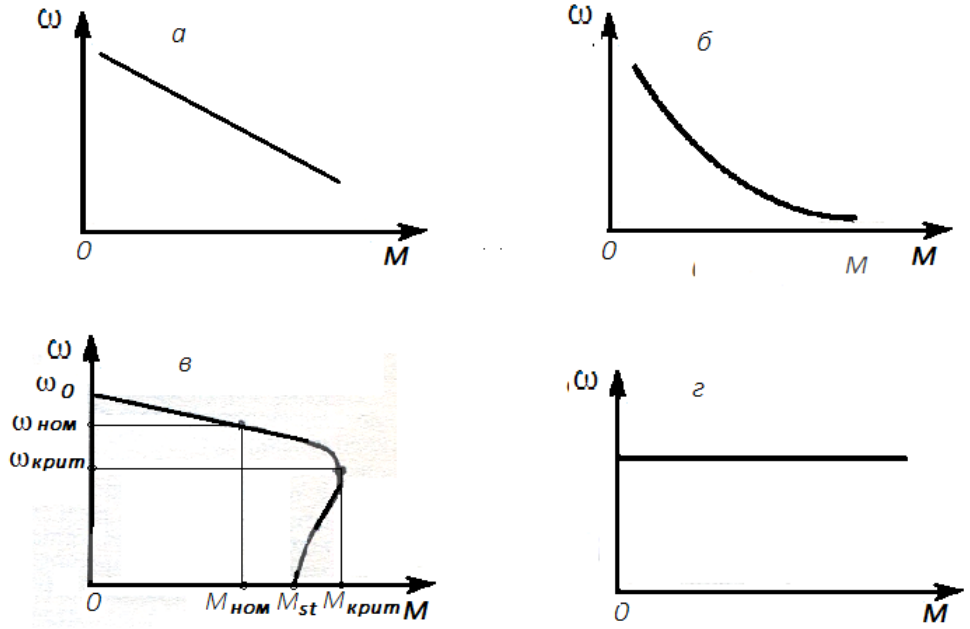


Рис. 3.2.25. Механічні характеристики електричних машин:
а, б – постійного струму паралельного і послідовного збудження (відповідно);
в – асинхронних; *г* – синхронних.

Призначення двигунів. Двигуни на *постійному струмі* виконуються у двох модифікаціях: двигуни з постійним магнітом та двигуни з обмоткою збудження (змінний магніт). Головною для цих машин є властивість неперервної зміни швидкості обертання в залежності від напруги живлення при незначних змінах механічної потужності на валу (незалежне збудження). Використовуються в тих випадках, коли наявна потреба у зміні швидкості. Головна слабка ланка таких двигунів – наявність щітко-колекторного вузла, особливо при експлуатації у важких умовах (трясіння, вібрація, різкі зміни температури, тиску, підвищена вологість).

Однофазні двигуни. Головні машини для побутової техніки незначної потужності. Коротко замкнутий ротор (великогабаритне) – пральні машини, або ж колекторні (малогабаритне) – побутовий електроінструмент.

Трифазні двигуни: синхронні та асинхронні. *Синхронні*: такі, частота обертання яких стабілізована внаслідок синхронізації обертання з частотою електричної мережі. Використовуються в системах, які потребують строгої постійності частоти обертання. Бувають як однофазні, так і трифазні. В залежності від конструкції ротора наявні такі типи синхронних двигунів: двигуни з постійними магнітами, реактивні та гістерезисні.

Асинхронні двигуни: дешеві, простої конструкції широковживані електричні машини середньої потужності; коротко замкнутий ротор. Висока тривалість експлуатації та надійність при механічних та кліматичних діях.

Крокові двигуни. Живляться так званим тактовим генератором, який генерує імпульси струму, що забезпечує необхідне дискретне кутове або лінійне переміщення вихідної ланки. Знаходять застосування в дискретних пристроях автоматичного управління, слідкуючих системах, виконавчих органах апаратів. Для крокових двигунів властиві такі показники: механічний крок двигуна, тобто кут поміж двома сусідніми стійкими положеннями ротора, механічна характеристика $M = M(f)$ – залежність силового моменту, що розвивається двигуном, від частоти слідування імпульсів управління (рис. *г*); при граничній частоті f_{lim} момент дорівнює нулю. Мінімальний кутовий крок ротора може досягати 0,006 rad (~ $0{,}36^0$), фіксуючі моменти – до 30-ти Н·см.

Лінійні електродвигуни. Ці електромагнітні перетворювачі забезпечують зворотно-поступальні переміщення для пристроїв позиціонування. Розрізняють мікродвигуни (хід кілька мікрометрів) і лінійні двигуни нормального виконання (хід від кількох міліметрів до кількох метрів). Випускають лінійні двигуни неперервної дії та лінійні двигуни дискретної дії (крокові двигуни). Класичні л. двигуни виконані з використанням дротових обмоток *електро-магнітний* принцип. Разом з цим промисловість випускає лінійні двигуни з іншими фізичними принципами: *п'єзоелектричним, магнітострикційним та електротермічним*.

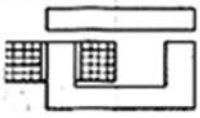
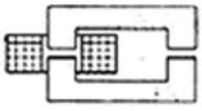
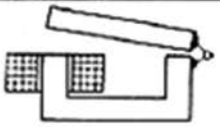
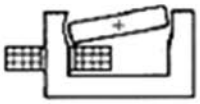
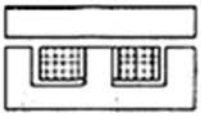
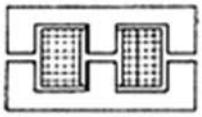
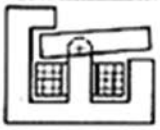
3.3.5. Електромагніти

Ці елементи є перетворювачами електричної енергії в механічну, переважно виконують зворотно-поступальний рух, причому рухомий елемент – феромагнітні деталі, які називають якорями. Рух якоря можливий завдяки

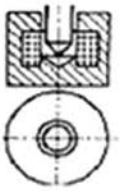
наявності повітряного проміжку (шпарини) поміж основним магнітопроводом, які бувають двох видів: Ш-подібного та П-подібного. Конструкції електромагнітів демонструються в табл. 3.3.1.

Таблиця 3.3.1

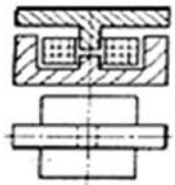
Конструкції електромагнітів

Нерухома частина магнітопроводу	Якір (рухома частина магнітопроводу)			
	плоский	Такий, що втягується	проворотний	Обертовий
П-подібна				
Ш-подібна				

Приклади електромагнітів з якорем, що втягується



Циліндричний магнітопровід. Кінчна поверхня контакту якоря і нерухомої частини магнітопроводу



Т-подібний якір та Ш-подібна нерухома частина магнітопровода. Плоска поверхня контакту якора і нерухомої частини магнітопроводу

3.2.4. Позиціювання елементної бази [13, 25, 27, 28, 29, 30, 36, 43, 45]

3.2.4.1. Вступні поняття

Позиціювання[1] (Пз.) – це приведення функціональних елементів приладу, в тому числі і систем (ланок) керування, до робочого стану. Завданням пристроїв (Пз) є переміщення робочого елемента функціональної системи приладу в задане положення (позицію). Результатом Пз. є повна готовність приладу до проведення вимірювальних або інших процедур відповідно до функціональної ідеї.

Процес Пз. здійснюється окремо або одночасно в просторі і часі. Пз. називають точним, якщо воно регламентується кількісним допуском на точність установки ланок керування, систем відліку або приладу в цілому. Точність Пз. прогнозується відповідними науково-технічними розрахунками, а в кінцевому варіанті здійснюється вивірювальний контроль з використанням мір (еталонів) фізичних величин в умовах експлуатації.

Сфера застосувань систем Пз. така:

1) креслярські та друкуючі пристрої;

[1] У розмовній практиці замість «позиціювання» використовують поняття наведення, підведення, налаштування, вивірка, інше.

2) точні лінійні та кутові вимірювання геометричних величин, геодезія та картографія;

3) оптичні прилади: слідкування за світними об'єктами та наведення на ціль, дальномірні пристрої, сканування оптичних полів, автоматичні препаратоводії мікроскопів та споріднених приладів, наприклад, офтальмологічних;

4) точні позиціювання у мікроелектронних технологіях;

5) позиціювання у мікропроцесорній техніці;

6) обробка матеріалів верстатами.

Особливе місце при аналізі процедур Пз. належить оптичним приладам і системам. Призначення цих процедур – це грубе та тонке наведення приладу на об'єкт спостереження або вимірювання. Розрізняють зовнішнє та внутрішнє Пз. Зовнішнє – орієнтація оптичної системи відносно об'єкта спостереження, внутрішнє – взаємна орієнтація елементів приладу при виконанні регулювальне-юстувальних операцій, налаштувань та вивірок.

Переміщення робочих елементів здійснюється в прямокутній або полярній системі координат. Відповідний передаточний механізм має забезпечити лінійний або обертовий рух. У приладах близької дії (інструментальні та інші мікроскопи, компаратори) використовується прямокутна система координат. Для приладів далекої дії характерна полярна система координат. Це геодезичні, астронавігаційні прилади, військова справа.

Зміст позиціювання елементної бази приладу зводиться до:

1) приведення системи керування до начала роботи;
2) приведення чутливого елемента до робочого стану;
3) приведення системи реєстрації до робочого стану.

Систему, що забезпечує цей процес, будемо називати позиціонером. Функцію позиціонера можуть виконувати:

– чутливий елемент вимірювального ланцюга (датчик фізичної величини);

– оптична система (об'єктив зорової труби, мікроскопа, фотоапарата);

– окремий елемент оптичної системи (поворотне дзеркало, компенсатор ходу променів, відбиваюча призма, кутниковий рефлектор).

Процес та процедури Пз. визначаються функціональною ідеєю приладу та системою комунікацій «прилад – оточення». З цієї причини необхідне роздільне вивчення або аналіз дій операцій позиціювання для кожної системи зокрема.

3.2.4.2. Способи позиціювання

Розрізняють такі види Пз. , [25]:

1) контактне або безконтактне;

2) реперне[2] або безреперне;

[2] Репер: в початковому смислі геодезичний знак у вигляді деякого об'єкта на місцевості з відомою абсолютною висотою над рівнем моря; вперше встановлений в Парижі на деякій споруді у вигляді металевого диска. У будівельній справі репер – це знак, який виступає як опорна точка при вивірці горизонту місцини (нівелюванні), що передує розбиттю площі ґрунту під споруду. На відкритій місцевості реперами об'єктом спостереження виступають знакові символи – вежі, одинокі дерева, опори лінії електропередачі тощо.

3) використання системи координат – прямокутної або полярної;

4) неперервне (перманентне) або з фіксованими положеннями.

Оптичним системам властиве переважно безконтактне Пз. Контактний спосіб зустрічається в рідкісних випадках, наприклад, в оптиметрах, оптикаторах, оптичних профілометрах, в яких здійснюється сканування поверхонь деяким інденторм (щупом), який механічно пов'язаний з оптичним елементом (наприклад, дзеркальцем), утворюючи з ним кінематичний ланцюг. Контактний спосіб властивий також і механічним щуповим профілометрам-профілографам.

До реперних знаків оптичних приладів відносять різноманітні шкали, сітки, перехрестя, які називаються візирними та відліковими системами приладу. Вони розміщені в площині зображення візуальних оптичних систем і розглядаються в окуляр одночасно із зображенням об'єктів. Візирні системи пов'язують об'єкт дослідження з приймачем сигналу; відлікова система забезпечує зчитування інформації в термінах загальноприйнятої системи мір.

Позиціювання в реперних системах полягає в суміщенні реперних елементів приладу та об'єкта.

В зорових оптичних системах деякі приклади зчитування інформації та види реперних знаків показані на рис. 3.2.26.

Умовно їх можна об'єднати так.

1) *Візирні перехрестя* (рис. 3.2.26, *а, б)* переважно мають розрив у центрі, який збільшує точність наведення, оскільки лінії не перекривають ціль.

2) Зчитування за шкалами у відповідній системі мір (рис. 3.2.26, *в, г, д*).

3) Пряме зчитування за основною шкалою та допоміжною – оптичному мікрометрі, яке використовується у оптичних теодолітах та гоніометрах (рис. 3.2.26, *г*).

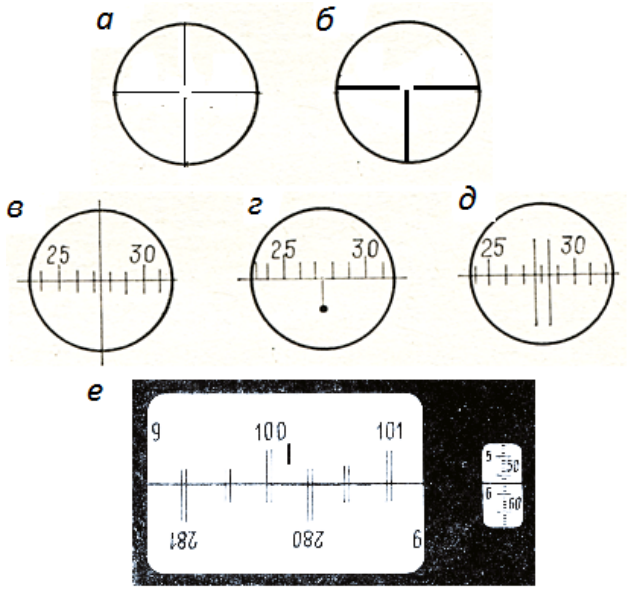


Рис. 3.2.26. Реперні знаки, приклади відлікових систем та зчитування зображення в оптичних приладах:

а, б – візирного перехрестя зорової труби;

в, г, д – зображення шкал з індексом візира різного виду;

е – оптичні теодоліти та гоніометри

Шкальні системи. Для них характерне таке зчитування інформації:

1) пряме зчитування по основній шкалі, а також поєднання основної та ноніуса для підвищення точності зняття відліку;

2) установку одного штриха посередині іншого;

3) візир у вигляді двох штрихів для підвищення точності установки відліку;

4) суміщення двох штрихів, причому один із яких нерухомий, а інший переміщується до положення, при якому один є продовження іншого.

5) зустрічне (або протилежне) переміщення зображення кругових шкал, що властиве приладам, шкали яких показані на рис. 3.2.26, *г*.

Розяснимо зчитування показів за відліковии шкалами рис. 3.2.26, *г*. Основний відлік – зображення зліва, де показано пряме зображення кругового скляного лімба та діаметрально протилежне (перевернуте), числова різниця поміж якими скадає 180 градусів (при належному положенні). Справа у віконці – зображення шкал оптичного мікрометра. Зчитування здійснюється таким чином. Основний відлік – оцифрований індекс зліва від мітки – це 100^0. Число десятка мінут – кількість інтервалів поміж індексами, що відповідають попередньо зчитаному (100^0) і нижньому оцифрованому, різниця поміж якими складає 180^0 . В нашому випадку – це число 1, тобто 10 мінут. Кількість мінут читаємо у віконці справа, ліве верхнє, тотбо 5, а секунд – у томуж правому віконці зліва, тобто 52.

Отже, результат зчитування: 100^0 15' 52".

В деяких приладах спостерігається використання ефекту Муара (муарові смуги) та відлік по спеціальних шкалах, які носять назву *трансверсалів*.

Для точних систем зчитування, особливо з великих екранів, рекомендоване використання растрових, так названих *трансверсальних* сіток (рис. 3.2.27) [13]. Ці сітки виконані у вигляді системи рядків і стовпців (штрихи, паралелограми), зміщених по вертикалі або по горизонталі. Зсув елементів по вертикалі або ж по горизонталі дорівнює періоду слідування знаків.

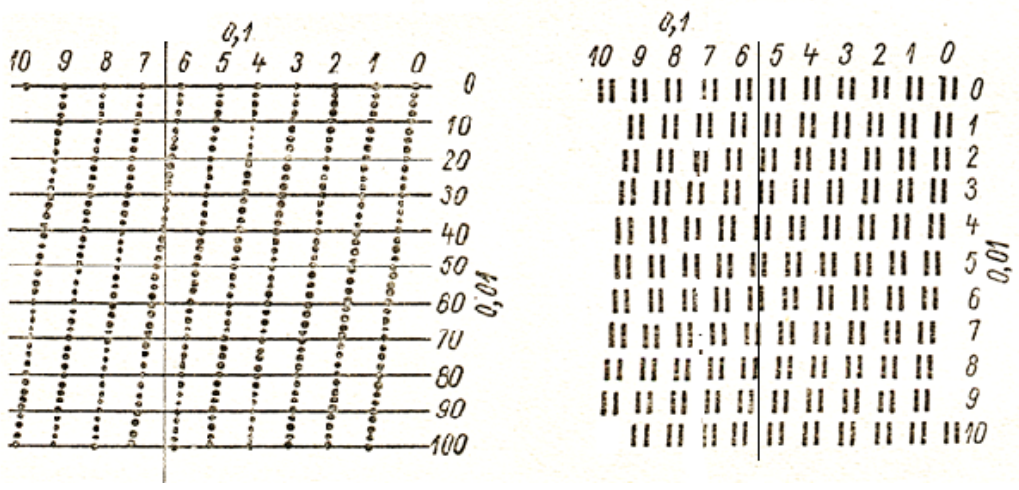


Рис. 3.2.27. Зчитування результатів вимірювання за трансверсалями (растрові сітки): вертикальне зміщення

Об’єктивізація реалізується поняттям *роздільної здатності* оптичних систем, яка характеризується як об’єктивними (критерій Релєя), так і суб’єктивними (роздільна здатність ока) факторами.

Для усунення суб’єктивного фактору щодо чіткості зображення сучасне оптичне приладобудування реалізувало два підходи: 1) використання растрових систем, які в разі недостатнього фокусування розсіюють зображення у полі зору окуляра (система мікропризм за Френелем); 2) автоматичне фокусування, використовуючи особливі електронні властивості деяких приймачів випромінювання (наприклад, ефект Крега для фотоопорів).

3.2.4.3. Точність позиціювання

Позиціювання називають *точним*, якщо воно регламентоване допуском на точність виконання дій. При реперному позиціюванні критерієм якості позиціювання є числова точність суміщення реперних елементів приладу і об’єкта. Суміщення реперних елементів приладу об’єкта завжди відбувається з деякою похибкою внаслідок обмеженої порогової чутливості ланок керування та наявності шпарин в кінематичних парах, з одного боку, а з іншого – обмеженої точності контролю за суміщенням та неточності виготовлення реперних знаків.

Похибка суміщення фізично виражається у вигляді похибки положення реперного елемента об’єкта відносно реперних елементів приладу.

Отже, суміщення реперних елементів здійснюється в межах деякої зони розсіяння, розмір якої визначається допустимою похибкою позиціювання. Схематично утворення зони розсіяння точності суміщення двох штрихів показані на рис. 3.2.28, *а*. Лінія 0-0 є осьовою лінією двох реперів, лінії b та b' указують на зони допустимого несуміщення штрихів; відстань $h = 2\delta$ між лініями b та b' представляє зону розсіювання положення суміщення штрихів.

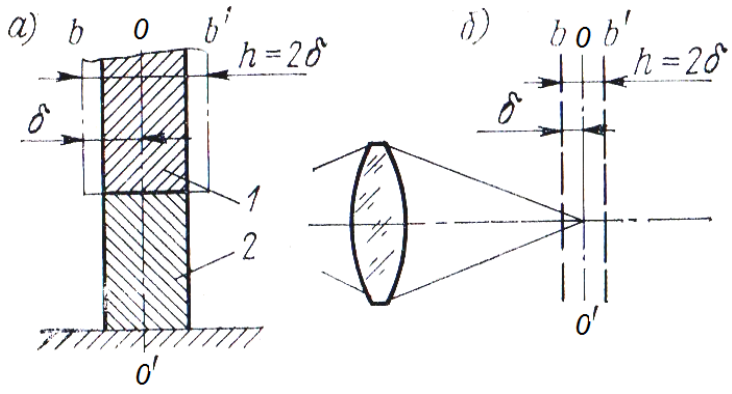


Рис. 3.2.28. Зони розсіювання для реперних (а) та безреперних (б) суміщень:

1 – реперний елемент (штрих) приладу;
2 – безреперний елемент об’єкта (глибина фокусування)

На рис. 3.2.28, *б* показане безреперне суміщення при фокусуванні об’єктива мікроскопа; зона суміщення $h = 2\delta$ показує глибину чіткості об’єктива при похибці суміщення $\pm\delta$. Отже, ширина зони суміщення визначається глибиною чіткості об’єктива, варіює в широких межах, від частки мікрометра і аж до декількох десятих міліметра, є його технічним параметром, який залежить від якості об’єктива.

Таким чином, ширина зони суміщення визначається глибиною чіткості об'єктива, варіює в широких межах, від частки мікрометра і аж до декількох десятих міліметра, є його технічним параметром, який залежить від якості об'єктива. Наприклад, глибина чіткості об'єктива мікроскопа при апертурі $A = 1{,}5$ складає всього $0{,}2 \ldots 0{,}3$ мкм. Зона суміщення поділок шкали і візиру (ширина штрихів $0{,}2 \ldots 0{,}3$ мм, спостереження неозброєним оком), при допустимій похибці суміщення, як вважається, $\pm 0{,}5$ ширини штриха, складе $0{,}2 \ldots 0{,}3$ мм. У розрахунковій практиці прийнято, що допустиме значення похибки зняття відліку складає $\delta = \pm(1/5 \div 1/10)$ частки ціни проділки (або імпульсу відліку) при ширині штриха, як указано, $0{,}2 \ldots 0{,}3$ мм.

3.2.4.4. Способи та засоби переміщень

В приладах можливі два способи керування позиціюванням – ручне та автоматичне. *Ручне керування* в переважній більшості випадків забезпечується засобами механіки з використанням маховиків, рукояток, барабанів з нанесеними шкалами, перемикачів на вході кінематичного ланцюга. Завжди супроводжується візуальним контролем результату. Переваги ручного керування такі: простота конструктивних рішень; належна надійність. Недоліки: низька швидкодія та залежність точності позиціювання від зовнішніх (кліматичних) умов та умов спостереження, низька технологічність.

Автоматичне керування виконується засобами електромеханіки та електромагнетизму, п'єзоефекту для мікропереміщень. Переваги: висока швидкодія та точність контролю. Для слідкуючих систем позиціювання завжди автоматичне.

Основними вузлами пристрою позиціювання є електродвигун або механічний рух «від руки» з одного боку, а з іншого – передача цього руху до об'єкта позиціювання. Сучасною тенденцією в принципах Пз. є використання крокових двигунів, які керуються обчислювачами з програмними управлінням. Переважно Пз-пристрої будуються зі зворотним зв'язком від точки установки об'єкта до системи управління двигуном, структурна схема якого показана на рис. 3.2.29.

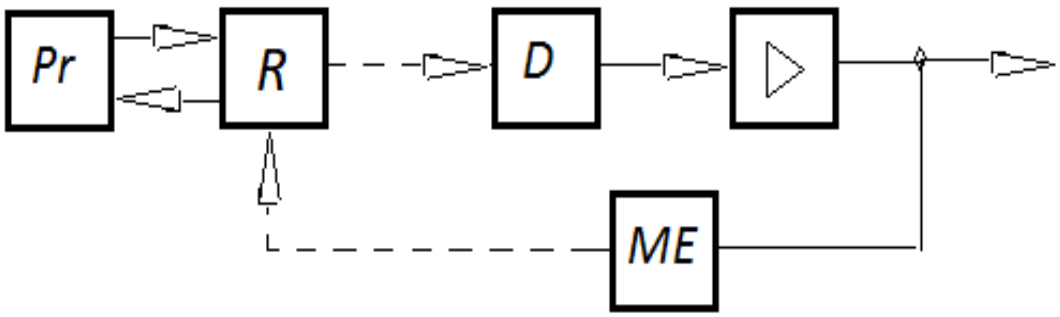


Рис. 3.2.29. Пристрій позиціювання зі зворотнім зв'язком:
Pr – датчик програми; *R* – регулятор; *Д* – двигун; ▷ – передача руху;
ME – вимірювальна система;

Комбінація крокових двигунів з датчиком програми забезпечує дискретні переміщення з деяким кроком. Використання регулятора дозволяє виконувати спеціальні вимоги до часових характеристик та точності суміщення реперів.

Вимірювання переміщень здійснюється датчиками переміщень, як лінійних, так і кутових. Номенклатура датчиків велика, розрізняють аналогові та цифрові.

Аналогові:

1) потенціометричні; 2) індуктивні; 3) ємнісні; 4) фотоелектричні.

Цифрові:

1) оптичні системи зі штриховим растром або ж із ПЗЗ-структурами;

2) датчик кодових сигналів, циклічні датчики абсолютних переміщень (індуктосин – лінійне переміщення, рундинктосин – кутове переміщення).

Якщо двигун не забезпечує лінійне або кутове переміщення з необхідним кроком, то на допомогу приходять механізми, як-от зубчасто-рейковий, гвинтовий (лінійне переміщення), зубчасті передачі (кутове переміщення).

При цьому можливі такі комбінації двигуна та передачі:

– лінійний крововий двигун з необхідними кінематичними та силовими характеристиками;

– неперервно працюючий лінійний двигун з муфтою для передачі поступального руху;

– крововий двигун з обертовим ротором і гвинтова передача;

– крововий двигун з обертовим ротором і кулачкова передача;

– крововий двигун з обертовим ротором та муфтою і зубчастою рейкою.

Використання прямої передачі дискретного руху від того ж таки дискретного двигуна (крокового) до виконавчого органу забезпечує значне спрощення обробки цифрових сигналів як основного виду сигналів сьогодення.

На цей час автоматизація процесу фокусування досягла неймовірного рівня, в чому переконується масовий споживач сучасних смартфонів.

3.2.4.5. Режими позиціювання

Процес позиціювання та результат залежить від відносної швидкості зближення робочого елемента з реперним елементом об’єкта, величина якої викликає динамічні процеси в елементах конструкції. Швидкість наближення і динамічні процеси істотно різняться для ручного та автоматичного позиціювання. У першому випадку, завдяки адаптивності оператора, швидкість наближення буде зменшуватись в міру зближення реперів, тоді як у другому вона постійна майже до самого моменту суміщення та зупинки механізму позиціювання.

Операція позиціювання проходить три фази:

1) грубе переміщення робочого елемента при підході до зони суміщення;

2) тонке переміщення;

3) коректування.

Ілюстрації цих фаз наведена на рис. 3.2.30, де показаний характер зміни швидкості переміщення при зближенні реперів (ручне керування) до зони суміщення. Перша фаза – це крива *1*, де ділянка *A′ B* відповідає за грубе переміщення робочого елемента в початковий період з поступовим зниженням швидкості; далі ця швидкість різко зменшується (ділянка *B′B*) до нульових значень на початку грубого суміщення (точка *C ′)*, з побоюваннями оператора перейти за номінальну точку суміщення *X*. Силовий імпульс, який розвивається оператором при спробі суміщення, невизначений і залежить від багатьох факторів, як об'єктивних, так і суб'єктивних (силового моменту зрушення рукоятки приводу керування, її конструктивних параметрів, психологічного настрою оператора, його досвіду та уміння). Ця невизначеність може призвести до того, що замість установки за кривою *2* отримується результат *3*. Поліпшення суміщення вимагає більш ретельних зусиль або ж використання механізму тонкої подачі.

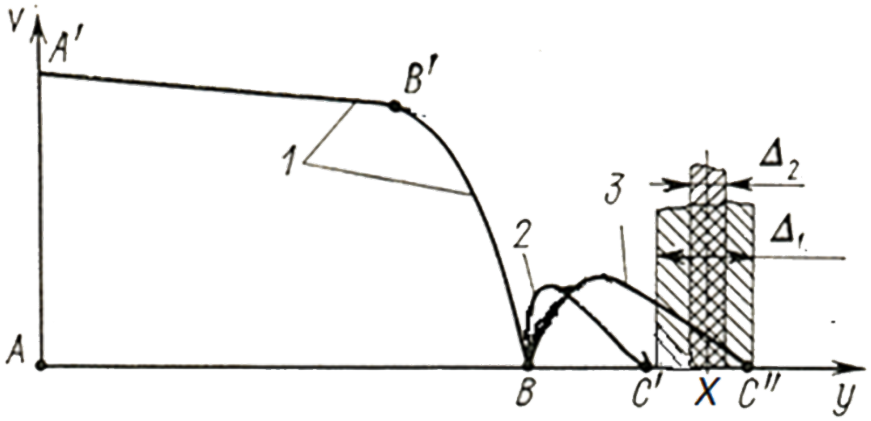


Рис. 3.2.30. Залежність точності позиціювання від швидкості переміщення робочого елементу установки:

1 – перша фаза, грубе переміщення; *2, 3* – друга фаза, тонке переміщення; Δ_1, Δ_2 – допуски суміщення; *X* – номінальне значення

На рисунку демонструються два допуски на точність суміщення: грубий Δ_1 та тонкий Δ_2 . У разі виходу за межі допуску (точка *C ′*) необхідне коректування: вивести рукоятку налаштування дещо назад (реверс), до зони суміщення, маючи на увазі наявність мертвих ходів кінематичних ланок та їх пружних деформацій, і повторити спробу суміщення.

Практика показала, що тренований оператор при видимій зоні суміщення 0,1 – 0,15 мм досягає суміщення на другій фазі.

Сумарна похибка позиціювання встановлюється як сума таких складових:

$$\Delta y_{\Sigma} = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3, \qquad (3.4.1)$$

де Δy_1 – похибки спрацьовування (мертвого ходу) систем; Δy_2 – похибка зчитування сигналу, яка визначається обмеженою точністю засобів зчитування; Δy_3 – похибка обмеженої чутливості приймача сигналу.

3.2.5. Керування роботою приладів (апаратів)

Розрізняють внутрішнє та зовнішнє керування.

Внутрішнє керування. Функція керування необхідна для реалізації процесу перетворення сигналу. Спеціальне системне розгалуження в каналі проходження інформації формує сигнал зворотного зв'язку, який і здійснює регулювання за наперед заданими законами. Забезпечується внутрішньою елементною базою технічної системи, яка підлягає аналізу.

Зовнішнє керування. Здійснюється системами телеметрії, переважно зовнішньою процесорною технікою. Розрізняють: ручне керування, слідкуюче керування, програмне керування.

*Ручне керування***.** Приклад такого розглянутий діями оператора, описаного попереднім рис. 3.2.30. Наявні два підходи в діях:

1. Вихідна величина *A(x)* пов'язана з керуючою величиною *W* ступінчатою функцією $\mathrm{A(x)} = kf(w), k = 1,2,3, \ldots$. Такий принцип характерний для приладів, які використовують для реєстрації фізичних величини (вольтметри з подільниками, змінна система об'єктивів та окулярів і т.і.).

2. Неперервна зміна $\mathrm{A(x)} = f(W)$ здійснюється оператором вручну відповідно до карти технологічного процесу керування або вимірювання.

Слідкуюче керування. Принцип слідкуючого керування – не дозволити виходу (викиду) основного параметра *A(x)* за наперед заданий рівень $A_0(\mathrm{x})$ або за наперед встановлені межі від $A_{\text{нижн}}(\mathrm{x})$ до $A_{\text{верх}}(\mathrm{x})$.

Програмне керування. В приладах використовується тоді, коли функція перетворення настільки складна, що навіть окремі операції по перетворенню виконуються за індивідуальним законом. Для цього необхідна відповідна послідовність регулюючих величин W_i. У системах з програмованим керуванням зі зворотними зв'язками реалізація функції перетворення залежить від змісту сигналу зворотного зв'язку, а операції цієї функції виконуються за визначеною програмою. В загальному, програмне управління використовує жорсткий або плаваючий зв'язок командних сигналів, які формуються тактовим генератором.

4. Захист приладів і оточення

[1, 3, 8, 18, 23–25, 30–38]

4.1. Вступні положення

Для належного виконання функцій технічні вироби підлягають захисту від багатьох факторів. З іншого боку, технічна система діє як на людину, так і на зовнішнє оточення, що однозначно вимагає врахуванню таких дій. Ці моменти вимагають ретельного аналізу й прийняття як технічних, так і загальних нормативних рішень. На сьогодні ці питання віднесені до пріоритетних. Тому вирішення питань захисту приладів і навколишнього середовища рекомендовано починати з етапу конструкторської підготовки виробництва.

Перелік факторів впливу на працездатність приладу та відповідно систем захисту, такі:

1) захист від зовнішнього проникнення;
2) захист від кліматичних дій, води та корозії;
3) захист від електричного струму;
4) захист від теплових навантажень;
5) захист від дій електромагнітних полів;
6) захист від механічних навантажень;
7) захист від звуку (та шуму).

Для виробника технічних виробів у цілому та приладів зокрема необхідне знання умов їх експлуатації, які в обов'язковому порядку будуть враховані при проєктуванні, конструюванні та виготовленні.

Зрозуміло, чим вищий захист – тим дорожчий виріб. Цей фактор змушує спеціалізувати захист в залежності від використання, а саме:

– використання всередині приміщень чи назовні;
– зовнішні кліматичні умови;
– стаціонарне чи мобільне (установка на транспорті, що переміщується);
– розташування під землею, на поверхні чи в повітрі або в космосі.

4.2. Захист від кліматичних дій і зовнішніх впливів

4.2.1. Кліматичні зони та райони. Кліматограма [1]

Нормальними кліматичними умовами вважається такі [ГОСТ+26]:

1. температурний діапазон $\theta = (25 \pm 10)$ ºС: (288 … 308) К;
2. відносна вологість повітря $\varphi = 45…80$ %;
3. атмосферний тиск $p = (630…800)$ тор: $(8{,}36 …10{,}6) \cdot 10^4$ Па;
4. При цьому, якщо $\theta > +30$ ºС, то вологість $\varphi \le 70$ %.

Для нормування властивостей технічних виробів відповідно до умов використання виділяють *дев'ять кліматичних зон* (табл. 4.2.1), що характеризуються метеорологічне близькими та статистично достовірними граничними

умовами навколишнього середовища – температура та відносна вологість повітря, парціальний тиск водяної пари, космічне випромінювання [1, 35].

Таблиця 4.2.1

Кліматичні зони

Кліматична зона	**Позначення**	**Приклад**
Помірна	**n**	Центральна Європа, Північ США
Помірно холодна	**nf**	Скандинавські держави, Південь Сибіру
Холодна	**f**	Центральна Канада, Центральний Сибір
Екстремально холодна	**ff**	Північ Канади, Північ Сибіру
Жарка суха	**ta**	Південь США, регіони Китаю, Індії
Екстремально жарка суха	**taa**	Судан
Жарка волога	**th**	Екваторіальні регіони
Почергова	**tha**	В'єтнам
Екстремально жарка волога	**thh**	Персидська затока

Але з економічної доцільності прилади і пристрої мають бути працездатними в більш широких кліматичних межах, тому близькі кліматичні зони об’єднують в *кліматичні райони* (табл. 4.2.2).

Граничні умови навколишнього середовища, що характеризують кліматичну зону, наочно можна зобразити за допомогою кліматограми (рис. 4.2.1).

Кліматограма – це ступінчата діаграма, яка демонструє ймовірні кліматичні параметри деякої кліматичної зони наперед означеного сезону за місяцями року [1,2]

На цій діаграмі дві паралельні до осі абсцис лінії відповідають значенням найвищого та найнижчого тисків водяної пари e, дві паралельні до осі ординат лінії – значенням найвищої та найнижчої температур повітря θ та дві лінії, що під кутом, – значенням максимальної та мінімальної відносної вологості повітря φ. Інші дані потрібно шукати у відповідних стандартах.

За допомогою побудованої таким способом кліматограми можна визначити ймовірності появи визначених погодних умов у досліджуваній зоні у відповідний період часу. При цьому лінії, що обмежують кліматограму, відповідають екстремальним погодним умовам, що зустрічаються зрідка, а область всередині кліматограми описує умови з високою ймовірністю появи.

Таблиця 4.2.2

Кліматичні райони

Кліматичний район	**Позначення**	**Кліматичні зони**	**Імовірна температура, ºС**
Нормальний (помірний)	**N**	**n, nf**	+40…- 45 ºС
Холодний	**F**	**n, nf, f, ff**	- θ > - 45 ºС
Сухий тропічний	**TA**	**ta, taa**	θ > +45 ºС
Вологий тропічний	**TH**	**th, tha, thh**	θ ≥ +20 ºС
Тропічний	**T**	**n, ta, th, tha**	+45 > θ > +20 ºС
Почерговий	**FT**	**f, nf, n, ta, tha, th**	+40…- 45 ºС
Універсальний	**U**	Всі кліматичні зони на суші	
Морський помірний	**M N**	Морська зона	θ = -10… + 20 ºС
Морський тропічний	**M T**	Морська зона	θ = +20… + 40 ºС

Понад 90% всіх можливих кліматичних умов знаходяться в межах кліматограми, побудованої за граничними середньодобовими значеннями конкретної пори року вибраної кліматичної зони (кліматичного району).

4.2.2. Класи виконання, експлуатації та випробувань [1, 36]

Для розробки та подальшої експлуатації необхідні конкретні дані про можливі кліматичні та інші дії. Кліматичний вплив зумовлений атмосферними умовами ззовні та всередині приміщень в залежності від часу доби та пори року. До таких умов відносять: температуру, вологість, тиск повітря, сонячне випромінювання, вітер, дощ, росу, сніг, лід, промислові гази, що входять до складу повітря (наприклад, Na CI, CO_2, SO_2), пісок, пил, промислові включення у вигляді пліснявих грибків і бактерій тощо. До умов впливу відносять також взаємодію з комахами, гризунами і термітами.

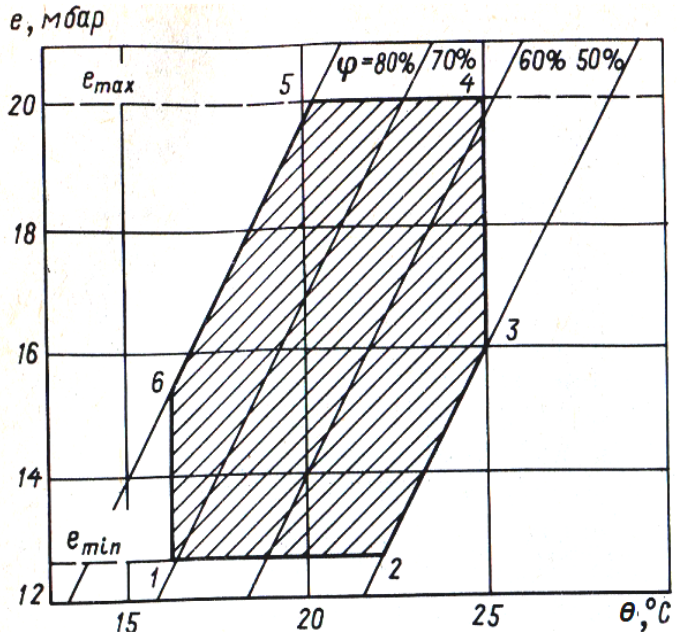


Рис. 4.2.1. Кліматограма: імовірні кліматичні параметри деякої кліматичної зони:
θ – температура;
φ – вологість повітря;
e – тиск водяних парів;
Кутові точки характеризують малоймовірні, але необхідні для врахування, проявів:
1 – найнижчу ентальпію (тепловміст) повітря;
2 – найнижчу вологість повітря;
3 – найгарячіше сухе повітря;
4 – найвищу ентальпію повітря;
5 – найвищу вологість повітря;
6 – найхолодніше повітря

Класи виконання характеризують умови експлуатації виробу. Позначення класу виконання складається з позначення кліматичного району (див. § 4.2.1) та *категорії установки*; все назване указує на умови експлуатації.

Класифікація по виконанню проводиться в тому разі, якщо вироби призначені для роботи переважно в мікрокліматичних умовах. Параметри очікуваних мікрокліматичних умов експлуатації можна оцінити з кліматограми, приклад якої наведений вище. Для приладів, які експлуатуються на відкритому повітрі, необхідно розширювати ступені захисту за всіма показниками.

Категорії установки, відповідно до стандартів, наведені в табл. 4.2.3. Клас та категорію установки підтверджують документацією на виріб і наносять у вигляді короткого позначення. Наприклад, клас **N III** призначений для використання приладів у нормальному та помірковано холодному кліматі у закритих приміщеннях із природною вентиляцією.

Перевірку придатності роботи виробів, класифікованих по виконанню, здійснюють під час прийомних *випробувань* за програмами. Програма випробувань розробляється відповідно до вимог, передбачених стандартами, технічними умовами або ж спеціально формулюються замовником.

Класи випробувань вказуються в технічній документації та визначають впливи, яким має бути підданий виріб у процесі випробування. Вироби, які віднесені до одного класу, мають відповідати одним і тим самим випробуванням, вказаним в конструкторській документації на виріб, або вимогам відповідних стандартів та інструкцій.

Позначення класу випробувань включає три групи цифр, розділених косими рисками: **25/085/04.**

Перша група (дві цифри) – температура випробувань на холодостійкість, °С;

Друга група (три цифри) – температура випробувань при нормальній вологості та підвищеній температурі, °С;

Третя група (дві цифри) – тривалість випробувань виробу під навантаженням в умовах високої вологості та температури.

Якщо у другій чи третій групах для вказаних параметрів випробувань необхідні лише дві чи одна цифра, то на початку відповідної групи цифр ставиться нуль. Наприклад, указаний вище клас 25/085/04 означає, що випробування мають бути проведені при температурі – 25 °С та при нормальній вологості і температурі +85 °С впродовж 4 діб. Результати випробувань мають враховуватися при розробці приладів з метою їх захисту, відіграють значну роль у їх працездатності.

Таблиця 4.2.3

Категорії установки приладів

Категорія установки	**Місце установки приладу**	**Умови експлуатації**	**Зовнішні дії**
АКІ	На відкритому повітрі	Для всіх кліматичних умов, що проявляються в зоні експлуатації	Забруднення повітря, пліснява, зміна температури, пісок, пил, роса, конденсат, іній, дощ, сніг, сонячні промені
АКІІ	Під навісом	Захист від дощу, снігу, прямого сонячного випромінювання; в решті випадків – робота на відкритому повітрі	Забруднення повітря, пліснява, швидка зміна температури, пісок, пил, роса, конденсат, іній
АКІІІ	В закритому приміщенні з природною вентиляцією	Відсутня штучна регуляція кліматичних умов; коливання кліматичних параметрів значно нижчі, ніж на відкритому повітрі	Забруднення повітря, пліснява, зміна температури та вологості, конденсат
АКІV	В закритому приміщенні з регульованим кліматом	Кліматичні умови не впливають на роботу приладу.	Зміна температури та відносна вологість незначні

Класи експлуатації. Позначають рядом цифр, відокремлених одна від одної косими рисками, та відповідним граничним значенням кліматичних умов і кодів, що розташовані за подвійною косою рискою та відповідають іншим параметрам (рис. 4.2.2). Якщо вказівка яких-небудь значень та кодів неможлива чи неважлива, то замість них ставиться риска. За умов аж до граничних, виріб повинен працювати короткочасно без обмежень виконання його основної функції та без погіршення властивостей. Перевірка працездатності у більшості випадків проводиться в межах прийомних випробувань за програмами, що вказані в конструкторській документації. Клас експлуатації вказується у паспорті виробу.

-40/ +70/ +30/ 90// 1 1 1 1
1 2 3 4 5 6 7 8

Рис. 4.2.2. Приклад позначення класу експлуатації:

1, 2 – мінімально та максимально допустимі температури навколишнього середовища;
3 – максимально допустима температура навколишнього середовища при максимальній відносній вологості;
4 – максимально допустима відносна вологість повітря;
5 – код пилу та крапель (0 – 4, 4 – максимальне навантаження);
6 – код забруднення повітря (0 – 3, 3 – максимальне навантаження);
7 – код плісняви (0 – недопустимі умови по відношенню до плісняви, 1 – допустимі умови);
8 – код механічних коливань та ударів (1 – 3, 3 – максимальне навантаження); значення кодів вибирають у відповідність до стандартів.

Упакування, зберігання та транспортування [2]. Кліматичні умови впливають на прилад також при зберіганні та транспортуванні. При зберіганні та транспортуванні приладів і їх запасних частин необхідно уникати впливів кліматичних навантажень, що не відповідають їх класам виконання чи експлуатації.

Вибір упаковки (табл. 4.2.4) дозволяє уникнути пошкоджень виробів під час транспортування при очікуваній частоті їх перевалок та очікуваних кліматичних умов, а також при зберіганні (відповідно до стандартів). Розрізняють *повітрепроникну* та *гермеричну* упаковку.

Повітрепроникна упаковка сприяє швидкму вирівнюванню вологи і температури всередині і ззовні, що запобігає (або обмежує) утворенню в упаковці конденсованої вологи або її швидкому випаровуванні.

Герметична упаковка необхідна на разі траспортування у тропічні райони; герметизація Зазвичай забезпечується розташуванням виробу у мішок з пластикової плівки або алюмінієвої багатошарової фольги, края якої герметизують зварюванням; у мішки розміщують мішечки з силікагелем.

Таблиця 4.2.4

Типи упаковки

Позначення	**Тип упаковки**	**Термін дії захисту від корозії**
VA1	–	Без захисту
VA2	Упаковка частинами	Без захисту
VA3	Торгова упаковка чи упаковка для транспортування	Без захисту
VA4	Упаковка для транспортування	До 1 місяця
VA5	Упаковка для транспортування	До 4 місяців
VA6	Упаковка для транспортування	До 6 місяців
VA7	Спеціальна упаковка для транспортування, включаючи упаковку для зберігання запасних запчастин	До 8 років

Для запобігання пошкодженням при транспортуванні наявні нормативні рекомендації, які наводяться в табл. 4.2.5.

4.2.3. Захист від дотику і проникнення сторонніх предметів та води. Ступені захисту

Захист від дотику визначає заходи із запобігання небезпеці для обслуговуючого персоналу зі сторони приладу: при дотику струмопідвідних або рухомих деталей, хімікалій тощо.

Захист від впровадження сторонніх предметів – заходи, метою яких є запобігання перешкодам (завадам) роботі приладу ззовні сторонніми тілами, тобто запобігання механічним втручанням в прилад.

Для приладів, які повинні працювати у вибухонебезпечних приміщеннях, а також у загазованих підземних виробках, необхідне присвоєння відповідних класів вибухової небезпеки і безпеки щодо газу.

Ступінь захисту указують умовним позначенням (табл. 4.2.6), яке стосується захисту струмоведучих або рухомих деталей. Якщо вимог до захисту від проникнення води нема, то друга цифра в позначенні замінюється буквою Х.

Таблиця 4.2.5

Кліматичні навантаження при транспортуванні

Умови транспортування	**Кліматична зона**	**$\Theta_{шіп}$, °С**	**Θ_{max}, °С**	**φ_{max}, %**	**e_{max}, кПа**	**$e_{шіп}$, кПа**
Кузов вантажного автомобіля	F	-35	40	95	2,0	–
	n	-10	40	95	2,666	–
	th, ta, tha	-5	50	95	4,0	–
Товарний відсік залізничного вагона: дерев'яна тара	f	-40	45	95	2,0	
	n	-15	45	95	2,666	
	th, ta, tha	-10	50	95	4,666	–
стальний контейнер	f	-50	50	95	2,0	–
	n	-20	50	95	2,666	
	th, ta, tha	-10	55	95	4,666	
Трюм корабля, розміщений						
вище ватерлінії	Північне і Балтійське моря, Північна Атлантика	-10	25	90	2,666	–
	Тропіки, субтропіки	25	40	90	4,0	–
нижче ватерлінії	Північне і Балтійське моря, Північна Атлантика	5	20	90	2,666	
	Тропіки, субтропіки	20	30	85	4,0	–
Вантажний відсік літака: кліматизований;	-	15	25	Мале	0,667	75
некліматизований	-	-30	±0	*	0,667	45

Примітка 1. Змінна відносна вологість, можливе випадання конденсату.
Примітка 2. e – тиск водяного пару.

Таблиця 4.2.6

Позначення ступеней захисту

Позначення	**Визначення**
Букви **I P** на початку позначення	**Скорочення від англ. "International Protection"**
Перша цифра 0...6	Захист від дотику і від попадання сторонніх предметів
Друга цифра 0...8	Захист від попадання води
C	Випробування на захист від крапель води для судових приладів, що відповідають ступеню 2 захисту від води.
R	Захисні корпуси з приєднуваними трубопроводами (наприклад, для примусової вентиляції)
W	Випробування на захист від затоплення з вказівкою глибини занурення (наприклад, W5 відповідає глибині занурення 5 м)

Захист від дотику та впровадження сторонніх предметів зашифрований у цифрах, зміст яких поданий у табл. 4.2.7.

Таблиця 4.2.7

Позначення захисту від дотику і впровадження сторонніх предметів

Перша цифра позначення	**Вид захисту від дотику**	**Вид захисту від попадання сторонніх предметів**
0	Не передбачений	Не передбачений
1	Від випадкового дотику рукою по великій площі	Від попадання твердих сторонніх предметів діаметром 50 мм
2	Від дотику пальцями	Те саме Ø ≥ 50 мм
3	Від дотику інструментами і від попадання сторонніх предметів Ø ≥ 2,5 мм	
4	Те саме, Ø ≥ 1 мм	
5	Повний захист від дотику	Від осідання пилу всередині виробу
6	Те саме	Від попадання пилу

Захист від води. Цей захист передбачає заходи щодо запобігання потраплянню води у виріб. Для цього встановлюють кожухи та ущільнення, які забезпечать захист всього приладу або окремих його блоків. Розшифрування цифр у позначенні захисту від води наведено в табл. 4.2.8.

Таблиця 4.2.8

Позначення захисту від води

Друга цифра позначення	**Вид захисту**
0	Не передбачений
1	Від вертикально падаючих крапель води при горизонтальному робочому положенні виробу
2 (2С)	Від вертикально падаючих крапель води навіть при нахилі виробу на ± 15° (2С - при ± 22,5 °) в двох взаємно перпендикулярних площинах з горизонтального робочого положення
3	Від води, яка у вигляді дощу з усіх сторін падає на виріб під кутом 60° до вертикалі.
4	Від водяних бризок, що падають в будь-якому напрямку
5	Від струменів води, що падають в будь-якому напрямку
6	Від попадання струменів води, що падають в будь-якому напрямку при несприятливих умовах
7	Від води при затопленні виробу при постійному тиску
8	Від води при обмеженому в часі затопленні при заданому тиску

Класифікація та використання ступенів захисту. У залежності від зони розташування та умов експлуатації захист поділяють на *п'ять класів* застосувань (табл. 4.2.9). Класи захисту необхідно вибрати так, аби унеможливити дотик людей, тварин до деталей, які знаходяться під напругою більше 42 В змінного і 65 В постійного струму (мінімальний ступінь захисту IP 3X). В пристроях з номінальною напругою до 1 кВ змінного або 1,5 кВ постійного струму для захисту від дотику необхідно конструктивно забезпечити мінімальну відстань, яка унеможливлює такий дотик (мінімальний ступінь захисту IP 4X).

При встановленні ступенів захисту від ураження струмом необхідно користуватися вимогами законів про охорону праці і пожежної безпеки.

4.2.4. Захист від корозії: загальні питання

До заходів захисту від кліматичних впливіввідносять вибір відповідних матеріалів поверхонь контакту виробу із зовнішнім оточенням та якість обробки цих поверхонь. Особливої уваги при цьому заслуговує небезпека корозії, під якою розуміють поширюване від поверхні контакту з оточенням руйнування твердого тіла під дією хімічних та електрохімічних факторів.

Захист від корозії здійснюється утворенням захисних шарів на поверхні виробу за допомогою *хімічної та електрохімічної* обробок, а при можливості та потребі – *фарбуванням*.

Захисний шар вибирається відповідно до класу корозійного навантаження, планованим терміном служби виробу та положенням деталі в приладі та просторі.

Нормування захисту здійснюється у відповідності до: 1*) класу* корозійного навантаження; 2) *виду* навантаження; 3) *ступені* навантаження.

Клас корозійного навантаження характеризує середньостатистичний стан атмосфери в зоні експлуатації виробу, що визначає корозійний вплив атмосфери на нього. Цей клас указується *комбінацією* позначень *виду* та *ступеню* навантажень і формує методологію вибору засобів, які необхідні для захисту від корозії. *Вид навантаження* визначає специфічні забруднення повітря, що викликають корозію виробу і позначаються буквами від А до D (табл. 4.2.10).

Таблиця 4.2.9

Класи застосування ступенів захисту від ураження струмом

Клас застосування	**Умови експлуатації**	**Приклади місць встановлення**	**Ступінь захисту**
1. Слабкий захист	Сухі приміщення без утворення конденсату	Житлові, адміністративні і торгові приміщення	IP 00[1], IP 10, IP 20
2. Помірний захист	Приміщення, в яких може з'являтися конденсат. Робота на заземлених транспортних засобах. Пристрої мають мати більш високий захист від дотику і попадання сторонніх предметів, ніж вказаний у кл. 1.	Кухні, холодильні камери, підвали, закриті тваринницькі приміщення, легкові і закриті вантажні автомобілі	IP 22[2] IP 30, IP 40, IP 41,
3. Середній захист	Тимчасова робота на відкритому повітрі	Приміщення, захищені від атмосферних впливів, палатки, площадки під дахом, підземні виробки	IP22C, IP 34, IP 43, IP 44
4. Сильний захист	Постійна робота на відкритому повітрі	Місця, які постійно піддаються атмосферним впливам	IP 54[3], IP 56, IP 65, IP 66
5. Повний захист	Тимчасове або постійне затоплення	Без означення	IP 67, IP 68

[1] Ступінь захисту IP 00 допустимий тільки для приладів, напруга в яких не перевищує 42 В змінного або 65 В постійного струму;

[2] У робочих приміщеннях, в яких працюють прилади з потенціалом відносно землі не більшим 65 В змінного або 100 В постійного струму або до 600 В, якщо захист перешкоджає обслуговуванню.

[3] У закритих робочих приміщеннях, в яких працюють прилади з напругою до 1 кВ.

Таблиця 4.2.10

Види навантажень

Вид навантаження	**Домішки в атмосфері, що викликають корозію**
A	Незначні
B	Подвійний оксид сірки
C	Хлориди
D	Хлориди і подвійний оксид сірки

Таблиця 4.2.11

Ступені навантажень (вид В) для установок I – III категорій

Вміст домішки *n*	**Ступінь навантаження для кліматичних зон**		
	ta, taa, f, ff	n, nf	th, tha, thh
$n_{SO_2} > 0,1$ г/(м^2 добу)	3	4	5
$n_{NaCl} < 0,3$ мг/(м^2 добу)	2	3	4

Ступінь навантаження залежить від кліматичної зони, категорії установки та вмісту домішок і позначається цифрою від 1 до 5.

У табл. 4.2.11 наведені ступені навантаження виду **В** деякого промислового району для різних кліматичних зон і вмісту домішок впливу.

Бачимо, що основна увага звернена на домішки NaCI, та SO_2. Найширше застосування має клас **В4**, який приписується зовнішнім корозійно-агресивним умовам промислових районів помірного та помірно холодного клімату.

В табл. 4.2.12 указані класи корозійного навантаження для типових груп виробів і терміни їх служби.

4.2.5. Вибір матеріалу і захист поверхні [1, 37]

Вибір матеріалу залежить від вимог, пов'язаних з виконанням функцій приладу, і від корозійних властивостей. При цьому необхідно брати до уваги електрохімічні властивості пари взаємодіючих матеріалів. Так, пара поверхонь електрично контактуючих металів при наявності електроліту між ними (наприклад, конденсаційної вологи, атмосферних опадів) може підлягати контактній або гальванічній корозії. Інтенсивність корозії залежить від різниці потенціалів, що виникає в зоні дотику металічних поверхонь (табл. 4.2.13). Утворені потенціали дуже сильно залежать від складу водного середовища між поверхнями контакту.

При виборі матеріалів з урахуванням їх електрохімічних потенціалів необхідно керуватися таким:

- різниця потенціалів двох металів повинна бути малою. Для апаратури зв'язку допустима різниця потенціалів до 0,5 В, для прецизійних приладів до 0,25 В;
- метали слід покривати захисними шарами, ізолюючи їх один від одного;
- площі дотику різних металів повинні бути малими, оскільки збільшення цих площ призводить до посиленої контактної корозії.

Таблиця 4.2.12

Основні класи корозійного навантаження і планові терміни служби груп виробів

Група	**Клас**	**Строк служби, років, не більше**
Апаратура зв'язку	**А2**	20
Вимірювальна апаратура	**В2**	5
Обчислювальні засоби	**А2**	10
Регулюючі прилади	**В3**	10
Корабельні електронні прилади	**С4**	5
Прилади для наукових досліджень	**В2**	10

Таблиця 4.2.13

Електрохімічні потенціали деяких металів

Метал	**Потенціал (мВ) при водневому показнику середовища**	
	pH 6,0	**pH 7,5**
Срібло	+194	+149
Мідь	+140	+46
Нікель	+118	+10
Алюміній	-169	-259
Олово	-175	-284
Свинець	-283	-335
Сталь	-350	-519
Кадмій	-574	-667
Цинк	-823	-809

Нижче наводяться додаткові заходи для зменшення корозії.

Нанесення металевого покриття. Метал, що має позитивний потенціал в порівнянні з контактуючим із ним металом, необхідно вкрити захисним металевим шаром в зоні стикання і навкруг нього. Вибір металу для захисного шару проводиться з урахуванням електрохімічних потенціалів, технології нанесення покриття, умов корозійного впливу, а також класу корозійного навантаження. Окрім цього, до уваги береться сортамент матеріалу і розміщення деталі (назовні чи всередині); стан мікрогеометрії поверхні (наприклад, матова або блискуча); спосіб отримання захисного шару; плановий термін служби.

Ізоляція. Електричний контакт між двома поверхнями металів, що контактують, нейтралізують декількома способами. Це використання металічних клеїв замість електрично провідних з'єднань, паперових, фторопластових та інших ізоляційних прокладок, фарбування поверхонь дотику (у випадку мало навантажених сполучень).

Кадміювання і оцинковка. Із міркувань економічності для захисних покриттів найбільш часто використовують цинк і кадмій. Корозійна стійкість цинкових і кадмієвих покриттів може бути значно підвищена наступним пасивуванням (хроматуванням або фосфатуванням). Контактним способом наносять срібло, нікель, хром і олово, які можуть бути осаджені на основний метал з водних розчинів. Унаслідок обмежених запасів кадмію і постійно зростаючої ціни на нього для покриття в електротехніці й електроніці часто використовують цинк. Але повністю замінити кадмій цинком неможливо, оскільки цинк дуже чутливий до корозійних впливів, що з'являються всередині приладу при вологості,

вищій 75-80 %. При використанні оцинкованих деталей необхідно, крім того, запобігати їх довготривалому контакту з конденсатом при експлуатації, транспортуванні й зберіганні.

В загальному, при виборі захисного покриття слід враховувати корозійні властивості середовищ, які можуть з'явитися всередині приладу.

Нанесення корозійне-захисних мастильних матеріалів. Цей спосіб застосовують для тимчасового захисту заготовок і напівфабрикатів від корозії під час їх зберіганні і транспортуванні, а також для внутрішніх деталей приладу, для яких з технологічних або технічних причин не можна використовувати інший спосіб, щоб забезпечити їх тривалий захист (наприклад, для пружин, деталей редукторів). Але необхідно мати на увазі, що тимчасові захисні мастильні матеріали необхідно оновлювати через певні проміжки часу відповідно до інструкцій та умов навколишнього середовища. При їх виборі враховується якість поверхні перед консервацією, клас корозійного навантаження кінцевого виробу, ціль консервації (проміжна або тривала консервація), а також конструкція деталі, яку захищають. Корозійні захисні мастильні матеріали запобігають дії наявної в атмосфері вологи на поверхню металу, їх захисна дія може бути підсилена добавкою речовин (інгібіторів), що сповільнюють корозію.

Фарбування. Зазвичай фарбування проводять у декілька прийомів: спочатку наносять ґрунтовий, а потім покривний шар, який інколи захищають лаковим покриттям. Ґрунт є проміжним шаром, призначеним для пасивації основної поверхні. Внаслідок високої адгезії він забезпечує надійний зв'язок покривного фарбового шару з основним матеріалом. Покривний шар служить для безпосереднього захисту від впливів навколишнього середовища, а також основою до нанесення лакового шару.

Як показує практика, корозія деталей з чорних металів, особливо невеликих, починається з країв, оскільки шар фарби на них недостатній. Тут проявляється підплівкова корозія, яка поступово веде до відшарування захисного покриття. Схожий процес розвивається в заклепках, різьбах і зварювальних швах. Для недопущення таких явищ необхідний додатковий захист країв, а також уникнення різкої геометрії країв використанням фасок з наступним округленням.

4.2.6. Конструювання систем захисту. Герметизація

У відповідальних випадках, поруч із заходами захисту від корозії, шкідливий вплив оточення на прилад можна зменшити або ж цілковито усунути конструктивними розв’язками. Прилад можна сконструювати так, аби агресивне середовище виявляло на нього по можливості мінімальну дію; при цьому врахувати причини, які підсилюють корозію.

Один з конструктивних принципів усунення зовнішніх впливів на функціональні та експлуатаційні властивості приладів – це герметизація (табл. 4.1.14).

Розрізняють *індивідуальну, часткову* і *повну* герметизацію. В свою чергу, герметизація може бути роз’ємною та нероз’ємною.

Роз'ємна герметизація досягається використанням роз'ємного корпусу, герметичність якого забезпечується ущільненням стиків кожуха з корпусом використанням прокладок: еластичних, переважно гумових і металевих (алюміній, мідь). Конструкції стиків ущільнень з гумовими прокладками показані на рис. 4.2.3. На разі, якщо для герметизації використати не гуму, а наприклад, повстяний матеріал, то об'єм приладу буде лише частково герметизований, захищений від пилу або ж аналогічних факторів впливу.

Таблиця 4.2.14

Якісна характеристика конструкцій з позицій герметизації

Конструкція	Переваги	Недоліки
Герметична	Захист від води і грибків, сповільнення дифузії водяної пари, великий строк служби осушувача	Конденсація води, ускладнений перехід до більш сприятливих умов оточуючого середовища, складність заміни осушувача
Частково герметизовано	Швидка зміна вологості, добрий захист від пилу	Попадання водяних бризів, розмноження грибків, малий термін осушувача (більш часта його заміна)
Відкрита з доброю вентиляцією	Внутрішній клімат відповідає зовнішньому, добра вентиляція запобігає появі грибкової плісняви	Небезпека попадання сторонніх тіл, підвищена чутливість до змін вологості

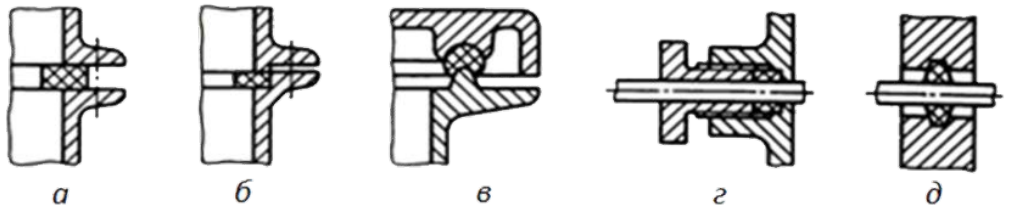


Рис. 4.2.3. Варіанти герметизації в приладобудуванні:
а) стикування відлитих кожухів без центрування;
б) стикування попередніх деталей, але з центруванням;
в) стикування нерухомих деталей профільними спряженнями (канавка під прокладку та гребінь);
г) герметизація валу, що обертається, за допомогою притискного сальника;
д) використання гумового або повстяного кільця

Нероз'ємна герметизація. При такому способу елементну базу приладів або інше розміщують у волого- і газонепроникливий корпус, що забезпечує працездатність технічної системи у жорстких умовах експлуатації. Інколи об'єм вакуумують або ж заповнюють інертним газом або ж азотом. Герметизація корпусу забезпечується зварюванням або запаюванням.

При виконанні герметизації необхідно враховувати можливість конденсації вологи при її надмірній концентрації всередині приладу. Для врахування цього розроблені принципи, відповідно до яких мають бути витримані температурні режими герметизації щодо допустимої вологості всередині технічної системи та температури експлуатації. Ці принципи відомі під назвою «діаграма Мольє» – рис. 4.2.4 [1].

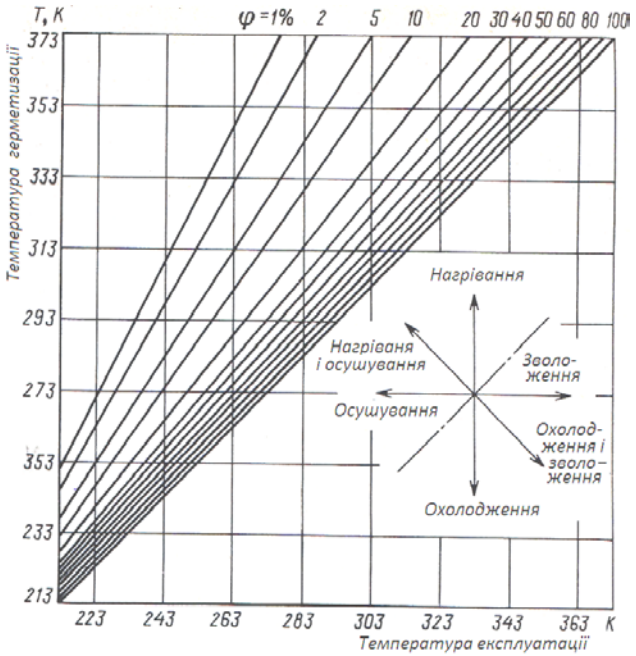


Рис. 4.2.4. Діаграма Мольє: температура герметизації об'єкта відповідно до екстремальної температури експлуатації при допустимій вологості елементної бази

Приклад. Нехай допустима відносна вологість φ = 5%, а температура експлуатації, при якій забезпечується працездатність, Т = 263 К (- 10 ºС); Тоді, відповідно до діаграми, температура герметизації має бути Т = 313 К (40 ºС)

У нижній правій частині показані технологічні дії для забезпечення необхідних температур та вологості. Такі дії виконуються у барокамерах.

У нижній правій частині показані технологічні дії для забезпечення необхідних температур та вологості. Такі дії виконуються у барокамерах.

Одним з способів запобіганню появи точки роси всередині приладу є *використання осушувача – капсули з силікагелем*, причому розрізняють робочий та індикаторний. Останній розміщують у окремому патроні в одному об'ємі з робочим. Патрон з індикаторним силікагелем облаштований віконцем для спостереження ззовні (оглядове віконце); зміна кольору свідчить про появу надмірної вологості всередині приладу внаслідок виснаження робочого силікагелю, тобто про потребу його регенерації або заміни.

4.3. Захист від електричного удару [1, 24, 27, 38]

4.3.1. Вступ

Захист від електричного удару для електричних приладів та пристроїв розрізняють на захист від безпосереднього дотику при нормальній роботі та на

захист від побічного дотику у випадку помилки в роботі. Класифікація заходів захисту наведена на рис. 4.3.1 [1].



Рис. 4.3.1. Класифікація заходів захисту від електричного удару

Відповідно до стандартів електричної безпеки, існують загальні вимоги до електричних пристроїв; разом з цим електронні прилади і пристрої апаратури зв'язку, а також електронні вимірювальні прилади, побутові електронні прилади та електричні пристрої мають відповідати спеціальним вимогам безпеки.

Згідно з нормами безпеки, граничні параметри електричних величин визначаються ***величиною струму***, що проходить через тіло людини, який є основним *фактором, що визначає ступінь ураження.*

Розрізняють такі ступені ураження:

Перший**:** 0,6 - 1,5 *мА* (при f = 50 *Гц*) – *пороговий відчутний струм*;

Другий: 10 - 15 *мА – пороговий відпускаючий*;

Третій: 20 - 25 *мА – дія струму розповсюджується на м'язи грудей,* що веде до ускладнення або припинення дихання. При дії такого струму тривалістю, що перевищує 3-4 хвилин, може настати смерть унаслідок припинення роботи легень;

Четвертий: 40 - 100 *мА – струм безпосередньо діє на м'язи серця*, викликає зупинення серця або його фібриляцію, тобто швидке, хаотичне скорочення волокон серцевого м'яза (фібрила); в результаті припиняється кровообіг, настає смерть.

Виходячи з розрахункового опору людини R = 1 кОм, безпечна напруга вважається такою: змінна $U_{\sim} \leq 42$ В; постійна $U_{-} \leq 65$ В.

4.3.2. Захист від прямого дотику при нормальній роботі

Усі деталі, які під час роботи знаходяться під напругою, мають бути ізольованими, екранованими або розташовані так, аби унеможливити дотик до них обслуговуючим персоналом. Кожухи та екрани виконуються таким способом, що їх зняття неможливе без застосування інструментів, в особливих випадках – спеціальних.

При змінній напрузі до 50 В (діюче значення), а також при пульсуючій випрямленій змінній напрузі до 60 В (середнє арифметичне значення) захист

можна не виконувати, за винятком медичних приладів, які підлягають спеціальним вимогам електричної безпеки.

В електронних вимірювальних приладах усі виводи, які знаходяться під напругою і дотик до яких небезпечний, мають бути належно захищені і розташовані на безпечній відстані від інших струмопровідних деталей, дотик до яких можливий і дозволений.

Верхні вентиляційні отвори виконуються у формі *жалюзі*. В інших випадках отвори в корпусах виготовляють і розташовують з одного боку в такий спосіб, щоби забезпечувався належний ступінь захисту, а з іншого – так, щоб вільно підвішений металевий стержень діаметром 4 мм, опущений всередину приладу на 100 мм, не дотикався до деталей, які знаходяться під небезпечною напругою. Належне розташування отворів у побутових приладах перевіряють за допомогою спеціальних щупів.

4.3.3. Захист від побічного допуску в разі помилки

Відкриті для дотику деталі електронних приладів, які не знаходяться під напругою (наприклад, корпуси), мають бути виконані так, аби навіть в аварійному випадку на цих деталях не з'явилась небезпечна напруга. Для всіх електротехнічних пристроїв і електронних приладів з номінальною напругою $U_{\sim} = 1$ кВ та $U_{-} = 1{,}5$ кВ необхідне беззастережне виконання вимог відповідно до їх класу захисту. Захисні заходи не вимагаються:

1) для приладів з усталеним струмом короткого замикання 20 мА;
2) для приладів з батарейним електроживленням та перетворювачем напруги ($U \geq 50$ В) при вихідній потужності $P_{\text{вих}} \leq 2$ Вт та при його внутрішньому опорі $R_i \geq 1$ кВ;
3) для елементів приладів, до яких можливий дотик тільки при знятій напрузі і в яких передбачені заходи, що унеможливлюють подачу напруги на деталі дотику;
4) для металевих деталей кріплення проводів і кабелів (наприклад, хомутів або скоб).

Ступінь захисту не може понижуватись під дією експлуатаційних факторів або при зовнішніх кліматичних діях. Так, в електронних приладах різьбові з'єднання мають бути додатково застопорені пружинними шайбами, а паяні – прикручуванням та згином проводів, які з'єднуються, що унеможливлює ослаблення з'єднань при механічних або допустимих температурних діях.

4.3.4. Класи захисту

Класом захисту визначають заходи, застосування яких унеможливлює появу на деталях, які підлягають дотику, небезпечної напруги в робочому режимі електротехнічних і електронних систем.

Встановлено три класи захисту.

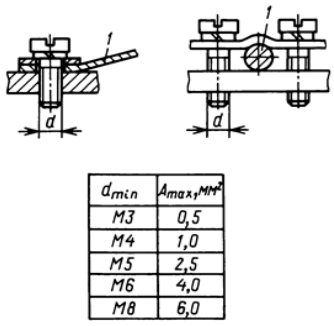
Клас захисту I – встановлення захисного заземлення, для чого передбачено конструктивний елемент під'єднання проводу заземлення (рис. 4.3.2) або спеціального з'єднувача (штекера).

Клас захисту II – наявність додаткової захисної ізоляції на деталях дотику.

Клас захисту III – використання захисної пониженої напруги відповідно до норм безпеки.

4.3.4.1. Клас захисту I: захисне заземлення

При цьому способі захисту провідна конструкція (шасі, корпус, стояк, шафа) з'єднує деталі приладу або установки за допомогою проводу з пристроєм захисту – плавким запобіжником або автоматичним вимикачем, який має малий опір. У випадку замикання через вказаний пристрій потече струм достатньої величини, який приведе його в дію і відключить систему від електричного живлення. Ось чому провідник, що з'єднує деталі із заземленням, має володіти малим опором, що забезпечується вибором матеріалу та площею поперечного перетину. Загальна інформація про мінімально допустимі площі поперечного перетину (А, мм^2) захисних провідників залежно від струму протікаючого струму (I_{max}, А), подана в табл. 4.3.1.



d_{min}	A_{max}, мм^2
М3	0,5
М4	1,0
М5	2,5
М6	4,0
М8	6,0

Рис. 4.3.2. Кріплення захисного провідника за допомогою різьбових з'єднань

Таблиця 4.3.1

Мінімальні площі перетинів захисних провідників

I_{max}, А, для провідників		А, мм^2	D, мм
мідь	алюміній		
6	-	0,5	*0,8*
10	6	0,75	*1,0*
16	10	1,0	*1,2*
20	16	1,5	*1,4*
25	20	2,5	*1,8*
35	30	4,0	*2,3*

Захисні конструктивні елементи приладів підлягають таким правилам:

1) різьбові з'єднання для кріплення *захисних провідників – заземлювачів* не можуть виконувати ніяких інших функцій, окрім основної, і забезпечуються елементами, що протидіють самовільному відкручуванню. До кожного заземлювача прикріплюється лише один захисний провідник, який роздільно приєднується до шини заземлення;

2) усі провідні деталі, дотик до яких можливий безпосередньо або побічно і на які у випадку помилки може бути подана електрична напруга, мають бути надійно сполучені і під'єднані до одного заземлювача приладу. Провідність цих з'єднань має відповідати провідності захисного провідника. При покритті лаком зони з'єднання необхідно враховувати можливість появи електрохімічної корозії;

3) захисні провідники повинні мати ізоляцію *жовто-зеленого* кольору, а зони їхнього розташування ззовні приладу мають бути помічені відповідними символами (рис. 4.3.3);

4) працюючі стаціонарні прилади класу захисту I повинні бути завжди приєднаними провідником захисту до шини заземлення; у пересувних приладах цього ж класу як з'єднувач використовується роз'ємне сполучення (штекер); клас захисту I для переносних приладів не застосовується;

5) захисні провідники вільно укладені й не підлягають розтягуванню; при розриві проводу живлення провід заземлення має зруйнуватись останнім, наприклад за рахунок дещо більшої довжини; з'єднання розірваних провідників (або з метою видовження) закручуванням неприпустиме;

6) приєднання захисних провідників має *передувати* підключенню приладу до мережі живлення, а при відключенні – від'єднується останнім.

В апаратурі зв'язку (або інше) класу захисту I захисні провідники висувних блоків мають бути надійно електрично сполучені з місцями їх підключення у шафах, каркасах (інше). При цьому у шафі або стояку має бути лише одне місце їх підключення. До ізольованого окремого вузла приладу необхідно прокладати окремий захисний провідник.

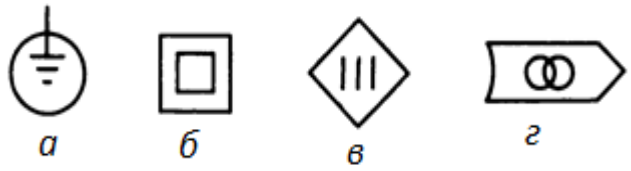


Рис. 4.3.3. Позначення захисту:
а – підключення захисного заземлення: *клас захисту I*;
б – захисна ізоляція: *клас захисту II*;
в – захисна понижена напруга: *клас захисту III*;
г – захисний транформатор

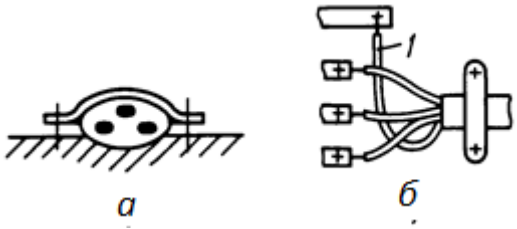


Рис. 4.3.4. Способи кріплення шнурів живлення:
а – кріплення кабеля хомутом;
б – видовження проводу заземлення

Опір між місцем приєднання захисного провідника і струмопровідними елементами, на які в разі пошкодження або помилки може бути подана напруга живлення, не має перевищувати 1 Ом.

1.3.4.2. Клас захисту II: захисна ізоляція

При використанні такого класу захисту деталі приладу, що знаходяться під напругою, дотик до яких можливий прямо чи побічно, додатково покриваються ізоляцією або ж наявна ізоляція посилюється. Опір ізоляції має бути не менше 1,5 мОм при випробуванні напругою не менше 4 кВ (діюче значення) впродовж 1 хв. Ізоляція має володіти доброю електричною, механічною, термічною і хімічною стійкістю.

В цьому класі захисту розрізняють три варіанти: *захисне ізолююче екранування*, *захисну проміжну ізоляцію* та *посилену ізоляцію*.

Апаратура зв'язку, виконана за класом захисту II, має мати потужність, яка не перевищує 6,3 кВт, не повинна підлягати дії статичної електрики, у зв'язку з чим конструктивно забезпечують захист від цього фактору впливу,

використовуючи захисне ізолююче екранування. У вимірювальних приладах класу захисту II використовуються всі три перелічені вище варіанти захисної ізоляції. Прилад з захисним ізолюючим екрануванням має мати жорсткий внутрішній корпус, виготовлений з ізоляційного матеріалу, який охоплює всі деталі, на які може потрапити висока напруга. Схеми захисного ізоляційного екранування та захисної проміжної ізоляції показані на рис. 4.3.5 та 4.3.6.

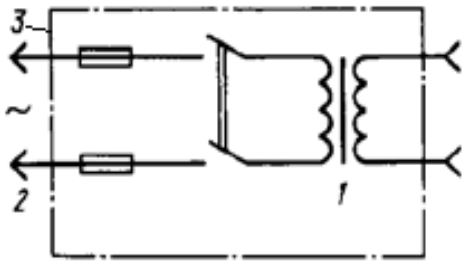


Рис. 4.3.5. Захисне ізоляційне екранування:
1 – мережевий трансформатор: класу захисту II;
2 – підключення до мережі;
3 – корпус з ізоляційного матеріалу

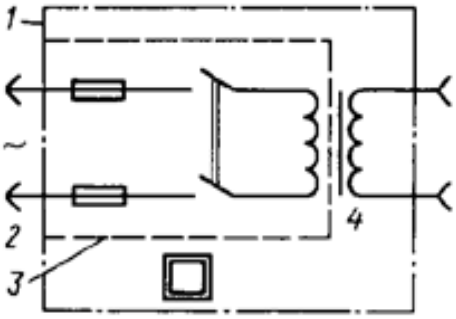


Рис. 4.3.6. Захисна проміжна ізоляція:
1 – металевий корпус;
2 – підключення до мережі;
3 – захисна проміжна ізоляція;
4 – трансформатор класу захисту II

1.3.4.3. Клас захисту III: захисна понижена напруга

Наразі, якщо напруга на вторинній обмотці трансформатора не перевищує 42 В, то прилади відносять до III класу захисту за електричною напругою, в яких вони використані (рис. 4.3.7). Приклад виконання блоку живлення приладу за II та III класами захисту зображений на рис. 4.3.8.

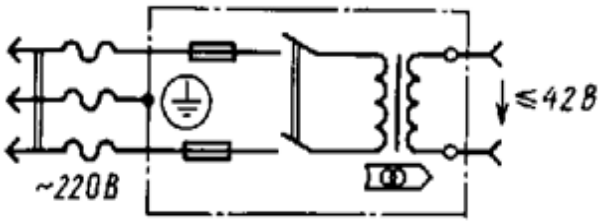


Рис. 4.3.7. Отримання пониженої напруги в схемах класу захисту III з екрануванням та заземленням

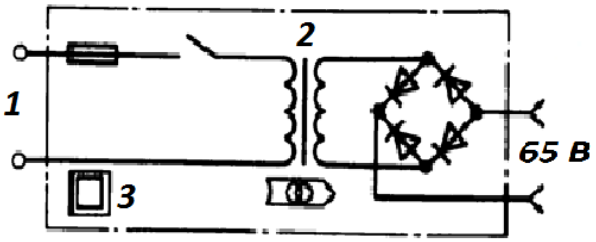


Рис. 4.3.8. Отримання захисної пониженої напруги класу захисту II, III:
1 – затискачі живлення;
2 – понижувальний трансформатор;
3 – захисна проміжна ізоляція

Недоліком цього способу є обмеження потужності, що передається, через понижену напругу. Ізоляція проводів розрахована на напругу 250 В і не менше.

4.4. Захист приладів від полів електричної і магнітної природи

[1, 24, 27, 39]

4.4.1. Вступні положення

4.4.1.1. Проблеми впливу

На роботу електронних приладів (або інших систем) негативно впливають зовнішні електричні та магнітні поля як природного, так і штучного походження. Негативний вплив розглядаються як *завади*; їх класифікують на *електричні*, *магнітн*і та *електромагнітні* (е/м). За характером зміни в часі основних параметрів розрізняють статичні та динамічні поля. Результатом дії статичних полів є наведення зарядів на металевих частинах, які формують ***наведений потенціал***. Динамічні поля породжують ***вихрові струми*** у замкнутих контурах, що особливо небезпечно для апаратури змінних сигналів.

Отже, внаслідок наведення зарядів у замкнутих ланцюгах електронної мережі приладу виникають напруги та струми, що приводить до:

1) виділення на деяких елементах великої кількості тепла, що спричиняє вихід з ладу цих елементів (електричний пробій);
2) наведення додаткового потенціалу на відповідних елементах, що порушує їх роботу з наступним викидом параметрів за допустимий рівень;
3) під впливом електростатичних та електромагнітних полів утворюються міжкаскадні зв’язки, які також порушують умови роботи приладу.

Наступна класифікація полів стосується динамічних процесів і будується на глибині проникнення е/м випромінювання в матеріал в залежності від частоти; зі зростанням частоти глибина проникнення спадає, але при цьому зростає поширюваність полів уздовж поверхні. Така властивість відома як скін-ефект.

4.4.1.2. Поняття полів

Сучасний ефірний простір заповнений хвильовими полями – електричними, магнітними, електромагнітними.

Електричне поле створюється електричними зарядами і зарядженими частинками в просторі. Поле нерухомої або рівномірно рухомої частинки нерозривно пов’язане з носієм – зарядженою частинкою. У фізиці електричне поле для двох заряджених частинок у стані спокою представляється картиною силових ліній – уявні лінії для наочного уявлення полів, які мають вигляд сонячних променів, породжених зарядженою частинкою і які губляться у зовнішньому просторі.

Магнітне поле створюється сукупністю орієнтованих твердих частинок з магнітними властивостями або ж при русі електричних зарядів по провіднику. Магнітне поле зображають системою замкнутих силових ліній, які розпочинаються на поверхні одного з полюсів магнітної частинки і замикаються на протилежному полюсі цієї ж частинки.

Електромагнітне поле – це особлива форма матерії, з допомогою якої здійснюється взаємодія між рухомими електрично зарядженими частинками. Природою виникнення електромагнітного поля є прискорений рух носіїв

електричних зарядів; саме з прискорених рухомих частинок електростатичне поле «зривається» і утворюється нова форма матерії – електромагнітне поле. Фізичною причиною існування цього поля є та обставина, що змінне в часі електричне поле породжує змінне магнітне, а змінне магнітне поле – вихрове електричне поле. Неперервно перероджуючись, обидві компоненти формують умови існування електромагнітного поля, яке не щезає, а поширюється в просторі, поза зарядами, які його породили, забезпечуючи швидкість поширення близьку до швидкості світла.

Параметри полів. Електричне поле характеризується напруженістю електричного поля (позначення «Е», розмірність СІ – В/м, вектор). Магнітне поле характеризується напруженістю магнітного поля (позначення «Н», розмірність СІ – А/м, вектор). При частотах 3 – 300 Гц як характеристика магнітного поля може також використовуватись поняття магнітної індукції (позначення «В», розмірність СІ – Тл (тесла)). Електромагнітні хвилі характеризуються довжиною хвилі (позначення «λ», розмірність СІ – м) або ж частотою (позначення – «ν», розмірність СІ – Гц). У дослідженнях вимірюванню переважно підлягає напруженість електричної складової електромагнітного поля Е. При частотах, що перевищують 300 МГц, інколи вимірюють густину потоку енергії хвилі – вектор Умова-Пойнтинга (позначення «S», розмірність СІ – Вт/м^2).

4.4.1.3. Класифікація електромагнітних полів

Однією з класифікаційних ознак є *«зональна» класифікація*, відповідно до віддаленості приймача від джерела генерації. За цим принципом електромагнітне поле поділяється на *ближню* та *дальню* зону (у оптиці – зона Френеля та зона Фраунгофера). Ближня зона – зона індукції, простягається на відстань від джерела, що дорівнює {0…3} λ. В цій зоні електромагнітна хвиля ще не сформована, напруженість поля спадає пропорційне квадрату або ж кубу відстані від джерела. «Дальня» зона – це зона сформованої електромагнітної хвилі. Тут напруженість поля спадає обернено пропорційно відстані до джерела. В цій зоні (для вакууму) справедливе експериментально встановлене співвідношення між напруженнями електричного та магнітного полів, а саме: Е = 377Н, де 377 – константа, хвильовий опір вакууму, Ом.

При поширенні в провідному середовищі вони зв'язані співвідношенням:

$$E = H\sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}e^{-kr}, \text{ В/м.} \qquad (4.4.1)$$

Тут ω – кругова частота електромагнітних коливань, с$^{-1}$;

μ – магнітна проникність середовища, Г/м;

σ – електрична провідність середовища, (Ом .м)$^{-1}$;

k – коефіцієнт загасання;

r – відстань до розглянутої точки, м.

Наступний підхід у класифікації – це *класифікація за частотами* відповідно до встановлених діапазонів (табл. 4.4.1 – радіодіапазони).

Електромагнітне поле *промислової* частоти – f = 50 Гц.

Електромагнітні хвилі *оптичного* діапазону безпосередньо не впливають на роботу приладів і апаратів, окрім теплового нагріву, який обумовлюється окремо.

Таблиця 4.4.1

Класифікація електромагнітних хвиль радіодіапазону

Найменування частотного діапазону	**Межі диапазону**	**Найменування хвилевого діапазону**	**Межі діапазону**
Вкрай низькі, КНЧ	[3...30] Гц	Декамегаметрові	[100…10] мм
Наднизькі, ННЧ	[30...300] Гц	Мегаметрові	[10…1] мм
Інфранизькі, ІНЧ	[0,3...3] Кгц	Гектокілометрові	[1000…100] км
Дуже низькі, ДНЧ	[3...30] Кгц	Міріаметрові	[100…10] км
Низькі частоти, НЧ	[30...300] Кгц	Кілометрові	[10…1] км
Середні, СЧ	[0,3...3] МГц	Гектометрові	[1…0,1] км
Високі, ВЧ	[3...30] МГц	Декаметрові	[100…10] м
Дуже високі, ДВЧ	[30...300] МГц	Метрові	[10…1] м
Ультрависокі, УВЧ	[0,3...3] ГГц	Дециметрові	[1…0,1] м
Надвисокі, НВЧ	[3...30] ГГц	Сантиметрові	[10…1] см
Вкрай високі, КВЧ	[30...300] ГГц	Міліметрові	[10…1] мм
Гіпервисокі, ГВЧ	[300...3000] ГГц	Децимініметрові	[1…0,1] мм

Акцентуємо увагу на *критерії поділу* електромагнітних хвиль на радіо та оптичний діапазон, між якими відсутня чітка числова частотна границя. До *радіодіапазону* відносимо ті коливання, що спричиняють явища або процеси, породжені магнітною складовою електромагнітного поля; приймачем таких коливань є *антена* як коливний контур. *Оптичний діапазон* – електромагнітні коливання, які спричиняють явища або процеси, породжені електричною складовою поля.

4.4.1.4. Основні джерела полів

Розрізняють поля природного та штучного походження.

Природні:

- Власне електричне поле Землі (Е =120…150 В/м);
- Власне магнітне поле Землі (Н = 24…40 А/м);
- Радіовипромінювання Сонця і галактик;
- Магнітні бурі;

- Атмосферні явища (електричні розряди, північне сяйво).

Джерела електромагнітного випромінювання *штучного* походження:

- Лінії електропередач;
- Теле- і радіотрансляційні станції;
- Радарні установки;
- Супутниковий і мобільний зв'язок (прилади, ретранслятори);
- Електротранспорт;
- Виробничі комплекси (заводи, фабрики, будівництво);
- Електропроводка (всередині будівель та споруд);
- Побутові електроприлади;
- Персональні комп'ютери.

Канали впливу на електронну апаратуру:

1) через мережу живлення;
2) через повітряний простір.

4.4.2. Заходи захисту від електричних та магнітних полів

Розроблений комплекс заходів із метою зменшення впливів на електронну апаратуру (електромагнітна сумісність), які поділяють на методичні та технічні.

4.4.2.1. Методичні заходи

Методичні – це *схемотехнічні, конструкторські* та *технологічні*.

Схемотехнічні заходи:

1) використання коротких схемотехнічних ліній та елементів гальванічної розв'язки;
2) застосування *LC*-фільтрів у мережі живлення;
3) використання амплітудного та часового стробування;
4) використання цифрових методів обробки сигналів.

Конструкторські заходи:

1) групування конструктивних завадозалежних елементів у вузли з наступним індивідуальним екрануванням (навіть окремих плат), особливо на вході схемотехнічної одиниці;
2) ослаблення паразитних зв'язків шляхом рознесення джерел та приймачів завад та їх екранування, ортогонального розташування провідників у сусідніх шарах друкованих плат, зменшення довжини взаємодотичних ділянок ліній, використання матеріалів з малою діелектричною проникністю;
3) вибір точок заземлення за раціональним принципом та збільшення їх кількості;
4) зменшення розмірів контактних з'єднань, наприклад заміною роз'ємних на нероз'ємні, включно еластороземірні.

Технологічні заходи:

1) зменшення розкиду параметрів елементів схеми та окремих провідних ліній завдяки виготовленню їх в одному технологічному циклі (до прикладу, *коаксіальний кабель*);
2) освоєння виробництва виробів з поліпшеними експлуатаційними властивостями, перехід від індивідуального виготовлення окремих елементів до інтегрального модульного.

4.4.2.2. Технічні заходи: екранування полів

Основним технічним методом захисту апаратури від е/м впливів є це екранування полів. *Суть екранування* – це розташування електронного приладу у просторово замкнутий кожух, виготовлений з матеріалу, який внаслідок взаємодії з полем блокує поширення випромінювання в зону розташування елементної бази. Ефективність блокування визначається, з одного боку, частотою поля, яка визначає глибину проникнення поля в матеріал, а з іншого – електричними та магнітними властивостями матеріалу екрана.

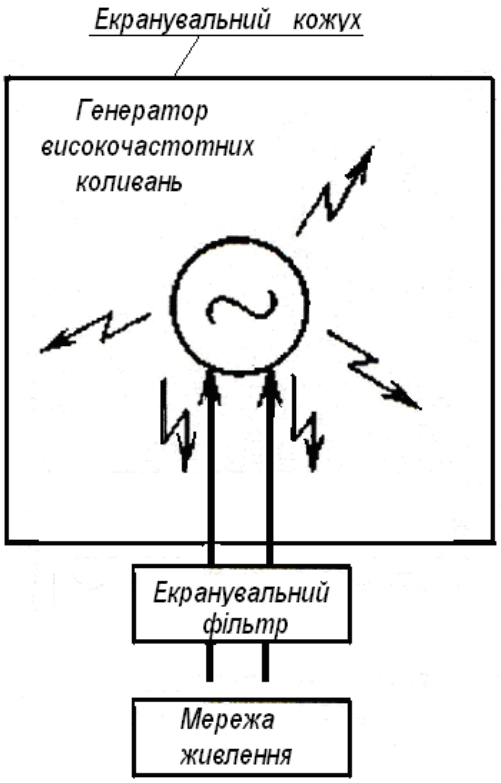


Рис. 4.4.1. Екранування генератора високочастотних коливань

Для розуміння питання уявимо собі деякий високочастотний генератор, що живиться від джерела постійного або змінного струму (рис. 4.4.1.).

Очевидно, генератор буде випромінювати у простір електромагнітне хвилі, які будуть джерелом завад для роботи іншого електронного обладнання. При цьому джерелом випромінювання будуть як окремі деталі самого генератора, так і мережа живлення. Для належного екранування недостатньо розмістити генератор у екрануючий корпус, необхідно також поставити перепону в мережу жив-лення приладу. Отже, під екраном будемо розуміти як названий корпус, так і перепону в мережі живлення, яку називають екранувальним фільтром.

При поширенні поля, потрапивши на перепону, частина його енергії відіб’ється від першої поверхні екрана, частина проникне в матеріал виготовлення і продовжить поширення, зазнаючи при цьому поглинання, до зустрічі з наступною поверхнею, від якої знову ж частково відіб’ється і вийде назовні, тобто наскрізь. Досягнуте при цьому ослаблення поля називається *екранувальною дією*; ефективність екранування оцінюється відношенням електричних напружень та струмів, напружень електричного і магнітного полів *після* та *до* екранування:

$$E_\phi = U'/U = I'/I = E'/E = H'/H. \qquad (4.4.2)$$

У радіотехніці використовується коефіцієнт затухання, під яким розуміють логарифм десятковий від $1/E_\phi$; одиниця вимірювання – децибел:

$$a_S = 201g\left({}^{1}/_{E_\phi}\right) \text{ [Дб]}. \qquad (4.4.3)$$

У техніці провідного зв'язку ця величина подається як логарифм натуральний, а одиниця вимірювань – непери:

$$B = \ln\left({}^{1}/_{E_\phi}\right) = 0{,}115a_S \text{ [Нп]}. \qquad (4.4.4)$$

4.4.2.3. Характеристика екранів

Загальна класифікація екранів подана на рис. 4.4.2. Класифікація побудована на трьох ознаках: вид поля, конструктивна форма, матеріал та конструкція стінок екрана. Тут поле збурення поділене на три групи: електростатичне, магнітостатичне, електромагнітне. Варто зазначити, що основним параметром негативного впливу є магнітна складова е/м поля, оскільки згідно із законом Ампера саме під дією магнітного поля у замкнутих електричних контурах генеруються електричні струми, які можуть спричинити збій у роботі електронних систем. Якщо магнітне поле частотою f пересікає замкнутий контур площею А, то в контурі генерується напруга

$$|U| = 2\pi f A|B|. \qquad (4.4.5)$$

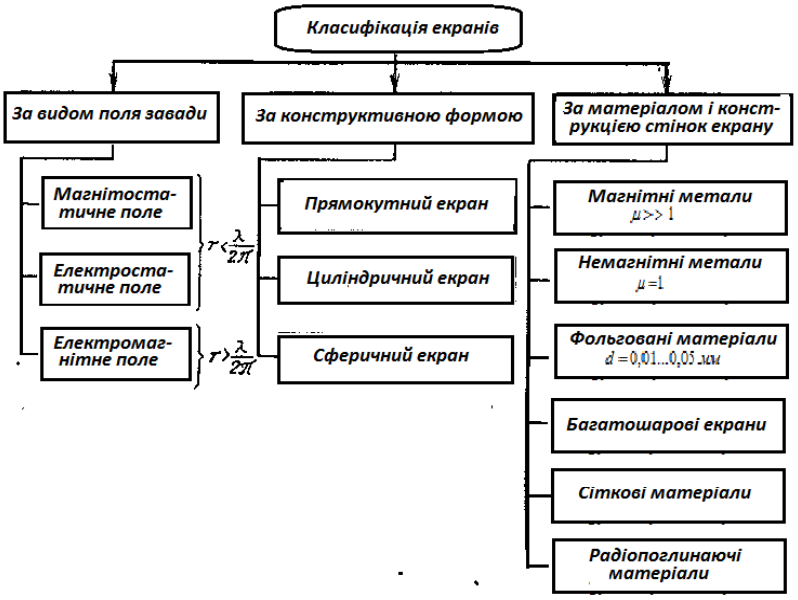


Рис. 4.4.2. Класифікація екранів електромагнітних полів

Розрахована за формулою (4.4.5) напруга $|U|$ і буде напругою завади для чутливих компонент електронної схеми.

Друга ознака класифікації – конструктивна форма. Знайшли застосування три геометричні форми екранів: прямокутна, циліндрична, сферична (рис. 4.4.3).

Третя ознака – це матеріал екранів, який вибирають залежно від виду поля та частоти.

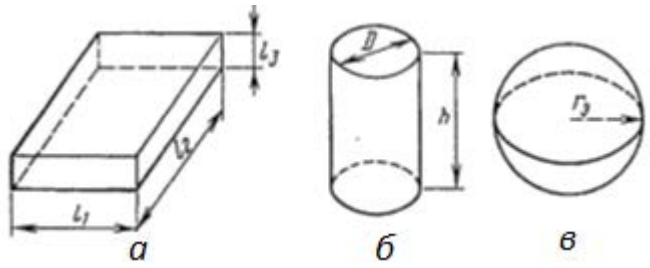


Рис. 4.4.3. Геометричні форми екранів:
а – прямокутна;
б – циліндрична;
в – сферична

4.4.3. Методика розрахунків екранів

4.4.3.1. Алгоритм розрахунків

1. Визначаємо тип поля завади. Область простору навколо умовного випромінювача електромагнітної завади ділиться на ближню $(r < \lambda/2\pi)$ і дальню $(r > \lambda/2\pi)$ зони, де r – відстань від випромінювача до екрана, λ – довжина хвилі завади. Якщо випромінювач подати у вигляді електромагнітного диполя, то у ближній зоні істотно переважає електричне поле, а якщо подати випромінювач як рамку зі струмом, то у ближній зоні буде переважати магнітне поле. Перший випадок – це електростатичне поле, другий – магнітостатичне. До прикладу, високовольтні компоненти в приладі можуть бути подані як електричний диполь, а котушки індуктивності, трансформатори, доріжки друкованих плат – як рамка зі струмом. У дальній зоні випромінювання потужності електричної складової поля і магнітної дорівнюють одна одній. Відповідності до принципу взаємності впливів в електронних пристроях екрануються як джерела, так і приймачі випромінювання.

2. Вибираємо конструктивну форму екрана, насамперед в залежності від форми електронного модуля, який підлягає захисту (рис. 6.3.3). Завперш форма впливає на характеристичний опір середовища навколо зони захисту, а отже, на ефективність екранування. Окрім названого, форма буде визначати резонансні властивості всередині екрана, при яких тут відбувається різке зростання електричного або магнітного полів. Для порівняння ефективності екранів різної форми вводять поняття еквівалентного радіуса $R_{екв.}$

Для екрана прямокутної форми $R_e = \sqrt[3]{(3/4\pi)l_1 l_2 l_3}$, для циліндричного екрана $R_e = \sqrt{(3/16)D^2 h}$; для сферичного екрана $R_e = r_e$. Найнижча резонансна частота може бути визначена за наближеною формулою

$$f_{\text{рез}} \approx \frac{138}{R_e} \cdot 10^6 \qquad (4.4.6)$$

Значення $f_{\text{рез}}$ не може входити у спектр частот завади.

3. Вибираємо матеріал і конструкцію стінок екрана. Матеріал стінок виявляє найбільший вплив на ефективність екранування. Величиною, яка характеризує екрануючу дію матеріалу екрана, є глибина проникнення δ: це глибина, на якій електричне поле зменшується в *e* разів:

$$\delta = {1}\Big/{\sqrt{\mu_0 \mu_r \sigma \pi f}}, \qquad (4.4.7)$$

де f – частота поля завади, МГц; μ_0, μ_r – відносна магнітна проникність відповідно вакууму та матеріалу екрана; σ – його питома провідність.

Для немагнітних матеріалів $\mu_r = 1$, а для феромагнетиків відносна магнітна проникність залежить від частоти. Для сталі визначається так: $\mu_r \approx 150 - 30f$ при $f < 4$ МГц, де f – частота, МГц. Якщо екран функціонує в магнітному полі ближньої зони, то ефективність магнітних матеріалів значно вища від ефективності немагнітних, оскільки $\mu_r \gg 1$. В електромагнітному полі дальньої зони немагнітні матеріали володіють вищою провідністю, ніж магнітні. У табл. 4.4.2 наведені електричні параметри найбільш уживаних для екранування матеріалів, а в табл. 4.4.3 – глибина проникності для основних частот.

Таблиця 4.4.2

Електричні параметри найбільш вживаних матеріалів екранів

***f*, Гц**	**δ, [мм]**			
	Cu	**Al**	**Fe**	
50	9,44	12,3	1,8	$\mu_r = 200$
10^2	6,67	8,7	1,3	
10^3	2,11	2,75	0,41	
10^4	0,667	0,87	0,13	
10^5	0,211	0, 275	0,36	$\mu_r = 1$
10^6	0,0667	0,087	0,11	
10^7	0,0211	0,0275	0,04	
10^8	0,0067	0,0087	0,01	
10^9	0,00211	0,0028	-	
$\rho \times 10^3$, [Ом·мм^2 /м]	<17,5	30,3	86	Ag 16,3

Для екранування завад високої частоти використовують тонколистові та фольгові матеріали, а також сітки. Сіткові екрани не чинять перепон конвективним потокам, виявляють високу ефективність у широкому інтервалі радіочастот. Екрануючі властивості металевих сіток проявляються головно у відбиванні е/м хвиль від їх поверхні. Параметрами сітки, які визначають її екрануючі властивості, є розмір комірки, який не має перевищувати $\lambda/4$, діаметр проводу та його питима провідність.

4. Далі розрахункам підлягає ефективність екранування вибраним екраном, а при необхідності – товщина екрана та інші конструктивні параметри.

4.4.3.2. Екранування електричних полів

Захист від статичного електричного поля здійснюється дуже простим способом. Досить розмістити об’єкт екранування у замкнуту металеву оболонку й електрично сполучити її з точкою нульового потенціалу. Наочним прикладом технічного розв’язку цієї задачі є зняття електростатичного потенціалу зі стінок

електронно-променевої трубки. Технічно це реалізовувалося металізацією тильної (задньої) поверхні кінескопа; там же встановлюються тонкі металеві пластини та провідний джгут, який слугує однією з оболонок конденсатора.

Схематично електрична схема цієї реалізації показана на рис. 4.4.4.

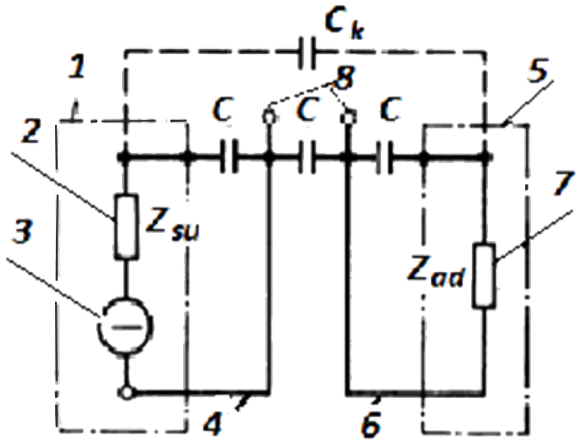


Рис. 4.4.4. Приклад екранування електростатичного поля кінескопа [1]:
1 – джерело завад;
2 – комплексний опір завад;
3 – генератор завад;
4 – екран завад;
5 – приймач завад;
6 – екран захисту;
7 – повний опір приймача;
8 – точки заземлення

Екрани 4, 6 з'єднуються з джерелом завад і виведені до точки заземлення. Очевидно, що наявність екрана збільшує ємність системи їх монтажу.

4.4.3.3. Екранування магнітних полів низької частоти

Для екранування магнітних *низькочастотних* полів використовуються феромагнітні матеріали з високою магнітною проникністю. Такими матеріалами є сталь для сердечників електричних машин, пермалой, хайперник, муметал. При наявності такого екрана магнітні силові лінії не проникають наскрізь, а проходять по його стінках, як це показано на рис. 4.4.5, оскільки магнітний опір екрана значно нижчий, аніж опір оточення. Але разом з цим деяка доля магнітного поля все-таки буде проникати всередину екрана. Затухання проникнення a_S, відповідно до формули (4.4.3), в залежності від параметрів циліндра, демонструє рис. 4.4.5, *а,* для найбільш уживаних матеріалів статичного екранування – на рис. 4.4.6. Якщо стінки екрана мають шви або стики, які розташовані перпендикулярно силовим лініям поля, його ефективність значною мірою погіршується внаслідок розсіювання поля через флуктуації магнітного опору на таких швах.

4.4.3.4. Принципи екранування магнітних полів високої частоти

Зі зростанням частоти поля розподіл силових ліній по поперечному перетині, як це показано на рис. 4.4.5, істотно змінюється: внаслідок скін-ефекту поле витісняється у приповерхневу зону. З цієї причини як матеріали використовуються високопровідні матеріали – Cu, Al та сплави на їх основі (латунь, бронза). У відповідальних випадках, наприклад, для поверхонь порожнинних радіолокаційних хвилеводів, здійснюється нанесення плівкового срібла. Глибина проникності для основних металів, що

використовуються для екранування, подана у табл. 4.4.2. Розрахунок проведений за формулою (4.4.6).

Поставимо на шляху змінного магнітного поля мідний циліндр, у якому під його дією збудяться змінні електрорушійні сили, що в свою чергу згенерують індукційні вихрові струми – струми Фуко. Магнітне поле цих струмів буде замкнутим, усередині циліндра буде направлене назустріч полю збудження, поза його межами – у той же самий напрямок, що й поле збудження. Результуюче поле виявиться ослабленим у циліндрі і посиленим поза ним; тобто відбувається витіснення поля з внутрішнього простору циліндра – в цьому і полягатиме його екрануюча дія. Очевидно, цей ефект буде тим більшим, чим більше збуджуюче поле. Густина вихрових струмів буде нерівномірною в перетині: вона зростатиме у приповерхневій зоні циліндра.

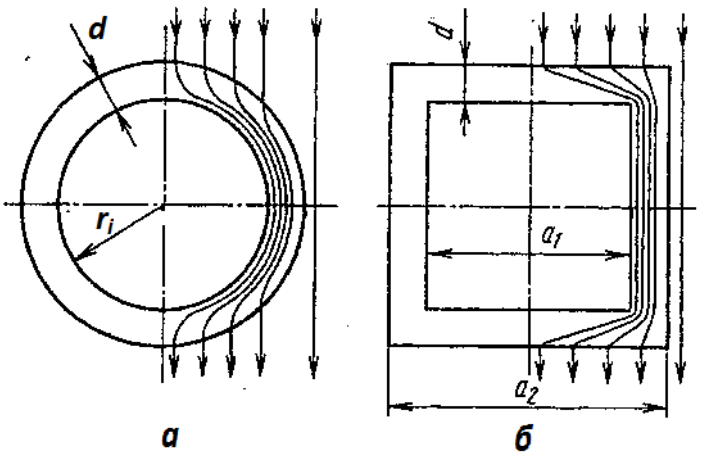


Рис. 4.4.5. Потік силових ліній по поперечному перетині магніточутливого матеріалу (частота 0…103 Гц):
а – циліндрична форма;
б – прямокутна

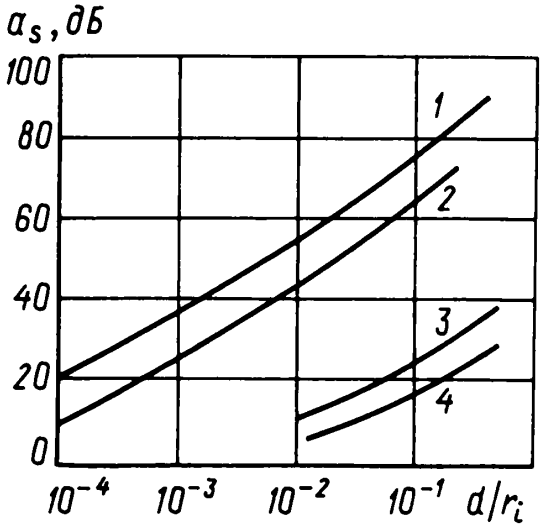


Рис. 4.4.6. Залежність коефіцієнта затухання a_S при магніто-статичному екрануванні від параметрів циліндра :
1 – хайперник (50% Fe+50% Ni), μ = 100 000;
2 – муметал (76% Ni+16% Fe+5% Cu+ 2% Cr+0,8% Mn), μ = 20 000;
3 – стальний лист, μ = 200;
4 – стальний лист, μ = 65

4.4.3.5. Узагальнення

Теоретичний розрахунок ступеня екранування, конфігурація екрана, конструкції фільтрів залежать від багатьох факторів, насамперед від частоти поля. Відмінності в екрануванні електромагнітних полів низької, середньої, високої та надвисокої частот можуть бути принциповими. Для низькочастотних статичних полів блокуючі властивості металевого екрана полягають в тому, що утворюється замкнутий електричний контур, з'єднаний із заземленням, а індуковані внаслідок дії поля на поверхні екрана заряди стікають у землю.

Якісне проектування екранів базується на нижченаведених узагальнення.

1. Загальний принцип вибору матеріалу екрана: добрий провідник конкретного поля буде також добре екранувати це поле. Цей принцип не поширюється на високочастотні поля, які породжують вихрові струми.
2. Коефіцієнт екранування у першому наближенні пропорційний товщині стінки для листового матеріалу.
3. Ефективність екранування підвищується при наявності деякого повітряного проміжку між об'єктом екранування та екраном; цей проміжок має бути не меншим аніж 10 мм.
4. Для змінних електричних та електромагнітних полів допускається використання металевих сіток із розміром комірок $\leq \lambda/4$, а також металізованих діелектричних листів та металевих плівок. Екрануюча дія перфорованих екранів залежить від розміру перфорації. Невеликі отвори в екрані, розміри яких малі в порівнянні з довжиною хвилі, не впливають на екрануючий ефект.
5. Екранування магнітних низькочастотних полів проводиться з використанням матеріалів із щонайвищою магнітною проникністю (сталь для сердечників електричних машин, муметал, хайперник, пермалой). Екранування магнітного поля середніх та високих частот здійснюється з використанням індукції в екрані вихрових струмів; з цієї причини рекомендований матеріал екранів – мідь та алюміній, причому для посилення скін-ефекту поверхні покривають гальванічним сріблом.
6. Конструкція екрана має бути такою, аби на шляху силових ліній завадо несучих полів не зустрічалися стики і шви з великим магнітним опором.
7. Окремо взятий матеріал не може ефективно блокувати широкий спектр випромінювання; в особливо відповідальних випадках застосовують такий принцип: об'єкт захисту оточують кількома екранами з принципово відмінними електричними, магнітними чи діамагнітними властивостями.

4.4.4. Мережа живлення

Найкраще розрахований і сконструйований екран не захистить прилад або оточення сам по собі, оскільки наявний електромагнітний зв'язок через мережу живлення. Відповідно до рис. 4.4.1, для захисту приладу від мережі живлення (і навпаки) використовується екрануючі фільтри. Функціональна суть цього фільтра – розв'язка джерела завад або приймача від лінії їх передачі та запобігання поширенню високочастотних завад завдяки їх розузгодженню з мережею живлення. Якщо окрема технічна система містить у собі джерело електромагнітного випромінювання, то необхідний аналіз працездатності цієї системи, відомий у спеціальній літературі як «електромагнітна сумісність».

Ми не будемо проводити тут аналіз щодо електромагнітної сумісності та приглушення завад і направляємо зацікавлених читачів до спеціальної літератури; нижче наведемо кілька класичних технічних прикладів електромагнітної розв'язки «технічна система – мережа живлення».

Використовують схеми з конденсаторами, з дроселями, а також комбіновані. До того ж промисловість випускає уніфіковані за споживаною потужністю протизавадні фільтри, насамперед для колекторних двигунів. На рис. 4.4.7 показані протизавадні фільтри для таких двигунів, які є джерелом завад.

До затискачів двигуна із заземленим корпусом (клас захисту I) можна приєднати здвоєний конденсатор C із заземленою середньою точкою (рис. 4.4.7, *а*). Інший варіант завадозахисту показаний на рис. 4.4.7, *б*. Тут паралельно затискачам двигуна із захистом класу II приєднаний конденсатор C_S, який пригнічує симетричну складову завад, тоді як для приглушення несиметричної складової слугує конденсатор C_U, який приєднується до одного із затискачів та корпусу двигуна.

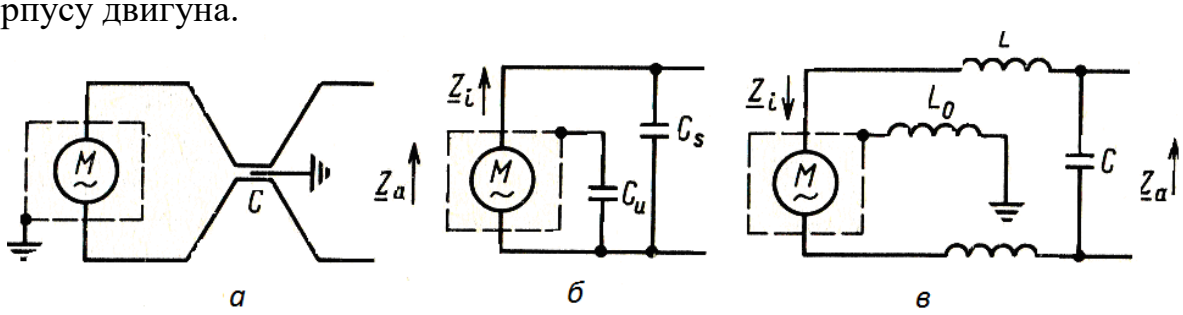


Рис. 4.4.7. Фільтри пригнічення завад електродвигунів:
а – двигун, клас захисту I, C = 0,05–1 мкФ;
б – двигун, клас захисту II, C = 0,05–1 мкФ;
в – двигун з малим внутрішнім опором, L = 0,1 – 10 мГн

Оскільки він сполучений з корпусом, на якість цього конденсатора накладаються особливо високі вимоги щодо безпеки експлуатації. У схемі рис. 4.4.6, *в* використана більшої ефективності комбінована схема приглушення завад – за поздовжньою (дросель L) та поперечною схемою (конденсатор C). Дросель L_0 встановлюють при значних несиметричних складових завад.

На рис. 4.4.8 показані стандартні електричні схеми протизавадових конденсаторів, які повсякчасно використовуються у всіх побутових приладах, апаратах та інструментах.

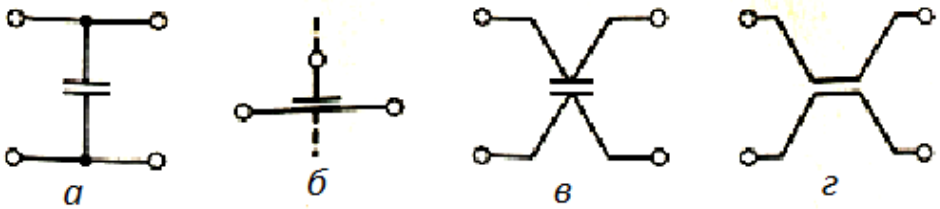


Рис. 4.4.8. Протизавадові конденсатори:
а – низько індуктивний нормальний; *б* – прохідний;
в – шунтувальний; *г* – прохідний шунтувальний

Завданням цих конденсаторів є пригнічення завад, які поширюються у мережу від джерела всередині приладу проводами живлення. Основною вимогою до таких конденсаторів є незначний прохідний повний опір при високих частотах та низька індуктивність. Але разом з цим кожна з показаних схем має свої особливості.

Низькоіндуктивний нормальний конденсатор (рис. 4.4.7, *а*) ефективний до частот приблизно 10 МГц. Прохідний конденсатор (рис. 4.4.7, *б*) ефективний включно до найбільш високих частот, робочий струм протікає через його середній провідник, що не спричиняє обмежень застосувань по струму. Шунтувальний конденсатор (рис. 4.4.8, *в*) являє собою симетричний чотириполюсник із пониженою індуктивністю виводів, що забезпечує йому функціонування як у УКХ-, так і НДЧ- діапазонах. Конденсатор (рис. 4.4.7, *г*) належить до класу прохідних шунтувальних.

Протизавадні конденсатори підлягають спеціальним вимогам безпеки експлуатації. Суть вимог – після відключення приладу ці конденсатори підлягають розряду впродовж 1 с до напруги, що не перевищує 34 В. Якщо конденсатор під'єднаний за мережевим вимикачем, то залишковий розряд відбувається через внутрішній опір приладу. Якщо ж конденсатор розташований перед вимикачем, то розряд має здійснюватися через спеціальний опір, який приєднується синхронно з відключенням мережі. Для пригнічення несиметричної складової завади протизавадні конденсатори вмикаються між струмопровідними деталями приладу й електропровідними деталями корпусу. Ці конденсатори мають володіти високою електричною та механічною міцністю, оскільки при короткому замиканні конденсатора, який забезпечує захист від замикання на корпус, повна напруга мережі може бути подана на корпус приладу.

4.4.5. Граничні значення радіозавад, що випромінюються приладами

Граничні значення напруги та напружень поля радіозавад, які генеруються приладами, не повинні перевищувати значень, визначених вимогами відповідних стандартів. Розрізняють вимоги для побутових та непобутових приладів. Для таких об'єктів як наукові та медичні високочастотні апарати, люмінесцентні лампи, радіоприймачі, електрообладнання двигунів внутрішнього згорання, електричні транспортні засоби тощо, норми випромінювання встановлюються окремо. Окремі норми встановлені також для приладів мобільного зв'язку.

4. 5. Тепловий захист приладів

[1, 3, 24, 35]

4.5.1. Вступ

Однією з важливих конструкторських задач в приладобудуванні є захист приладу в цілому та його елементної бази зокрема від теплових дій, природа яких двояка: 1) зовнішнє оточення приладів; 2) власні теплові поля.

Природа *зовнішніх* теплових полів: кліматичний фактор, низькотемпературні умови стратосфери та космосу, робота приладів у підземних шахтах, гарячих виробничих цехах. Природа *власних* теплових полів – це так звані активні елементи, які внаслідок споживання електричної енергії та обмеженого значення коефіцієнта корисної дії нагріваються, формуючи *нагріті зони* у замкнутому об'ємі, сформованого корпусом приладу.

Нагріті зони умовно поділені на три групи.

Перша. Такі, в яких відносно великі активні елементи (трансформатори, електроні лампи, конденсатори) розміщуються безпосередньо на шасі або виділені в окремий блок (приклад – блок живлення комп'ютера).

Друга. Нагріті зони, в яких джерела тепла (мікросхеми , опори) кріпляться на плати з електро- та теплоізоляційного матеріалу.

Третя. Нагріті зони, в яких відсутні явно вираженні плати або шасі з елементами, що створюють ці зони; нагріті деталі розміщені хаотично в об'ємі корпусу. Нагрівання приладу здійснюється просторовим полем температур. Температура приладу залежить від потужності розсіювання нагрітих зон, перетворених у приладі в теплоту, а також від розташування в ньому джерел теплоти.

Нормування теплових режимів апаратури. Для аналізу теплових режимів роботи апаратури та об'єднання їх у класи розроблена система СЗТР – *система забезпечення теплових режимів*, в основі якої лежать відповідні стандарти.

Класифікація СЗТР здійснюється за такими ознаками:

1) теплофізичні параметри, процеси. Наприклад, діапазон температур, фізичні явища передачі тепла, робоча речовина;
2) сфера розміщення апаратури (земля, шахта, літак) і зв'язок апарата із середовищем.

Визначальним поняттям системи СЗРТ є поняття *«нормальний тепловий режим»*, під яким розуміють виконання таких умов:

1) температура приладу в цілому знаходиться в межах температури експлуатації того елемента, який найбільш уразливий до температурних дій; наприклад, для Ge-транзисторів температура експлуатації не може перевищувати 60°С;
2) вказані межі звужуються при заданні кількісних характеристик та параметрів надійності роботи технічної системи.

Тепловий режим вважається нормальним, якщо для всіх елементів, змонтованих у прилад, виконується сформульовані вище вимоги. Під оптимальною конструкцією приладу з точки зору теплових режимів будемо розуміти конструкцію з оптимальними експлуатаційними характеристиками та параметрами при даному тепловому режимі. Поняття «оптимальні характеристики» можуть змінюватися залежно від призначення приладу (радіоелектронного).

Питання теплового захисту повстає в таких випадках:

1) у разі непродуктивного розсіювання електричної потужності, коли ККД технічної системи малий;
2) унаслідок великих змін температури оточення приладу за короткий час.

Частка корисної споживаної потужності:

– системи обробки інформації, вимірювальні прилади – 5 – 10 %;
– прилади-генератори фізичних полів – 80 – 90 %.

В плані теплового аналізу прилади поділяють на:

– такі, які не споживають зовнішньої енергії: механічні, оптичні;
– прилади, для роботи яких необхідна зовнішня електрична енергія.

Остання група приладів: електричні, електромеханічні, електронні. Наявність у різних видах загальних ознак і характеру протікання в них процесів теплообміну дозволяє об'єднати їх в класи. Ознаками для об'єднання в класи є:

1) кількість і конструктивні особливості нагрітих зон;
2) спосіб охолодження нагрітих зон;
3) спосіб охолодження корпусу приладу.

Головне правило розташування нагрітих зон:

1) уверху внутрішнього об’єму корпусу;
2) на поверхні задньої стінки або біля неї, над якими не розташовують компоненти, які бояться перегріву.

4.5.2. Фізичні основи теплових процесів

Згідно з другим началом термодинаміки, тепло від більш нагрітого тіла самовільно переходить до менш нагрітого. Процес теплообміну відбувається тим інтенсивніше, чим більша різниця температур цих тіл. При відсутності різниці температур процес теплообміну припиняється, настає *термодинамічна рівновага* між нагрітими та холодними зонами приладу; відбувся прогрів приладу. Це справедливо для замкнутих систем, до яких можна віднести і прилади, оскільки їхня елементна база розташована у замкнутому корпусі.

Вважається, що одночасно з прогрівом встановлюється і стаціонарний функціональний режим: прилад готовий до дій.

Строгий розв’язок задачі переносу тепла від нагрітої зони у приладі базується на диференціальних рівняннях і практично неможливий. Однак завдяки зусиллям видатних математиків Лапласа та Пуассона, Фур’є та Кірхгофа, для стаціонарного поля задача переносу тепла була розчленована та спрощена внаслідок формулювання 4-х граничних умов, суть яких така.

Гранична умова *першого роду* – це встановлення математичного вигляду температурного розподілу в замкнутому об’ємі корпусу, тобто $\theta(t) = f(x, y, z)$.

Суть *трьох наступних умов* – це виявлення та розмежування фізичних процесів, відповідальних за перенос тепла, а саме:

1) теплопровідність – Φ_λ,

2) конвекція – Φ_k,
3) випромінювання – Φ_S.

Визначальним та об'єднуючим фактором цих процесів є формулювання феноменологічного рівняння, справедливого для всіх трьох фізичних явищ переносу тепла, математичний вигляд якого такий:

$$\Phi = \alpha A \Delta\Theta. \tag{4.5.1}$$

Тут: Φ – тепловий потік, *Вт*; α – коефіцієнт теплової передачі, *Вт/(м²·К)*; A – площа поверхні нагрітої зони, *м²*, $\Delta\Theta$ – перепад температур між нагрітою та холодною зонами або ж між двома ізотермічними поверхнями, *К*.

Для динамічного процесу переносу сформульоване таке рівняння:

$$\Phi(t) = \frac{Q}{\Delta\Theta}\frac{d(\Delta\Theta)}{dt}. \tag{4.5.2}$$

Тут Q – кількість теплоти, *Вт·с (Дж)*; t – час, с; $\Delta\Theta$ – перепад температури, *К*.

Перейдемо до розгляду названих процесів переносу тепла, починаючи з термодинамічної (теплової) моделі приладу.

4.5.3. Термодинамічна модель приладу

Термодинамічна (теплова) модель приладу зображена на рис. 4.5.1 [1]. Відповідно до схеми, елементна база приладу розміщена у обмеженому замкнутому просторі (кожусі). Підключимо прилад до зовнішнього джерела енергії. Споживана потужність $P_{Сп}$,корисна потужність $P_{Кор}$. Початок роботи приладу супроводжується нагрівом його елементної бази, кількість витрат тепла на нагрів обчислюється за відомою у термодинаміці формулою $Q = cm\Delta\Theta,$ де c – теплоємність елементної бази, m – її загальна маса, $\Delta\Theta = \Theta_2 - \Theta_1$ – зміна температури, починаючи від начальної Θ_1 (до увімкнення приладу), до Θ_2, яку набуде елементна база у процесі прогріву в деякий момент часу t_2. Прилад випромінює у зовнішнє середовище потоки тепла всіма можливими тепловими процесами: теплопровідністю Φ_λ, випромінюванням Φ_S, конвекцією Φ_K.

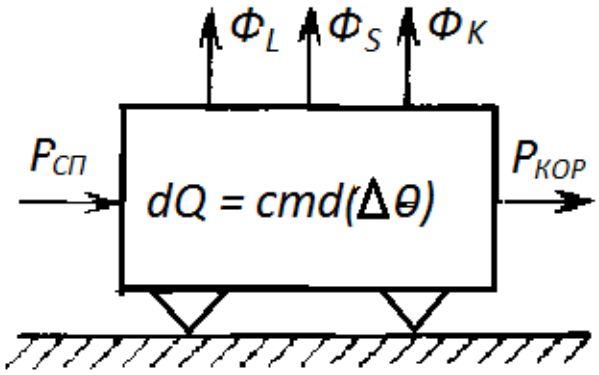


Рис. 4.5.1. Термодинамічна модель приладу

Очевидно, рівняння теплового балансу приладу матиме такий вигляд:

$$P_{Cn} = \Phi_\lambda + \Phi_S + \Phi_K + dQ/dt + P_{\text{Кор}}. \quad (4.5.3)$$

Або ж повні теплові витрати приладу як розсіювання P_Σ будуть:

$$P_\Sigma = P_{Cn} - P_{\text{Кор}} = \Phi_\lambda + \Phi_S + \Phi_K + dQ/dt. \quad (4.5.4)$$

З деяким часом наступає теплова рівновага, прилад прогріється, входить у так званий «усталений», тобто стаціонарний, режим, при якому подальше підвищення температури елементної бази припиняється.

Очевидно, що у стаціонарному стані

$$dQ = 0;\ dQ/dt = 0. \quad (4.5.5)$$

За таких умов рівняння (4.5.4) набуває вигляду

$$P_\Sigma = P_{Cn} - P_{\text{Кор}} = \Phi_\lambda + \Phi_S + \Phi_K. \quad (4.5.6)$$

Акцентуємо, що одночасно з набуттям стаціонарного режиму наступає функціональний режим роботи приладу, при якому його експлуатаційні параметри набувають номінальні значення.

Зазначимо, що для опису температурних полів розроблений так названий релаксаційний метод, в основу якого покладене припущення ізотермічності поверхонь окремих ділянок приладу. Середню температуру поверхні визначають за допомогою розв'язання системи неоднорідних алгебраїчних і системи диференціальних рівнянь.

4.5.4. Теплові явища та процеси

4.5.3.1. Теплопровідність

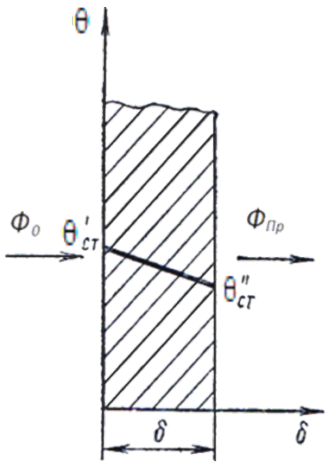


Рис.4.5.2. Передача теплоти еплопровідністю через одношарову стінку

Теплопровідність розглядається як фізичний процес поширення тепла в твердих тілах. В рідинах теплопровідність може розглядатися лише сумісно з конвекцією або випромінюванням або з обома цими процесами одночасно.

Розгляд процесу передачі тепла теплопровідністю проводиться на прикладі проходження тепла через деяку стінку (рис. 5.4.2) товщиною δ, температура поверхонь якої відрізняється і складає θ_1 та θ_2, причому $\theta_1 > \theta_2$. Обов'язковою умовою передачі тепла від стінки до стінки є відмінність їх температур $\Delta\theta \neq 0$.

Беручи за основу формулу (4.5.1), тепловий потік через одиничну товщу стінки буде:

$$\Phi = \lambda A \Delta\theta/\delta. \qquad (4.5.7)$$

Тут λ – теплопровідність; являє собою величину, що характеризує здатність матеріалу передавати теплоту. Формула (4.5.7) відома як закон Фур'є.

Теплопровідність є параметром матеріалу, що залежить від його структури і густини, а також від температури, тиску. Для твердого тіла вона представляється у вигляді двох складових:

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_s, \qquad (4.5.8)$$

де λ_e – електронна теплопровідність, λ_s – теплопровідність теплових коливань і хвиль.

Подаємо формулу (4.5.7) у вигляді:

$$q = \Phi/A = \lambda \Delta\theta/\delta. \qquad (4.5.9)$$

Тут $q = \Phi/A$ – поверхнева густина теплового потоку, *Вт/м*^{2}.

Тепер спрямуємо $\delta \to 0$; при цьому $\Delta\theta$ також попрямує до малої величини $\Delta\theta \to 0$. Відповідно до математики нескінченно малих величин, формулу (4.5.9) можна записати:

$$q = \lambda(d\theta/dx) = -\lambda grad\theta. \qquad (4.5.10)$$

Ця формула відома як закон Фур'є для теплопровідності.

Нижченаведена формула (4.5.10) дозволяє формулювати електричні аналогії. Для цього перетворимо цю формулу в такі форми:

$$q = \Delta\theta/R, \quad R = \delta/\lambda. \qquad (4.5.11\ а), (4.5.11\ б)$$

Тут R – термічний (тепловий) опір стінки, що дорівнює відношенню товщини стінки δ до її теплопровідності λ *(м*^{2} *·К/Вт)* .

У вигляді (4.5.11 *а*) формула аналогічна закону Ома: сила струму дорівнює відношенню різниці потенціалу до електричного опору. Цей підхід ліг в основу розрахунків теплопровідності методами електротехніки.

Для нормальних умов, окрім указаних спеціально, теплопровідність найбільш уживаних матеріалів подана у табл. 4.5.1.

Металам властива електронна провідність, причому $\lambda_e >> \lambda_s$.

Відповідно до закону Відемана–Франца, для чистих металів $\lambda_e \sim \gamma$; це означає, що теплова провідність пропорційна електричній провідності γ.

У якісній формі *закон Відемана–Франца* звучить так: добрі провідники електрики є добрими провідниками тепла.

Таблиця 4.5.1

Теплопровідність λ (Вт /(К · м)) для різних матеріалів

Матеріал	**λ**	**Матеріал**	**λ**
Метали		***Неметали***	
Алюміній (99,9 %)	225	Азбест (картон)	0,18
Алюміній (99 %)	205	Фетр	0,05
Силумін (85 % Al 13% Si)	160	Скло	0,80
Бронза олов'яна		Скловолокно	0,05
(75% Cu +25% Sn)	27	Кварцове скло	1,45
Алюмінієва бронза		Слюда	0,36
(95 % Cu + 5 % A1)	82	Гума	0,17
Залізо (99,9%)	60	Текстоліт	0,34
Чавун	58	Епоксидна смола,	
Вуглецева сталь	45	армована скловолокном	0,31
Вольфрамова сталь (20 % W)	39	Гетинакс	0,26
Нікелева сталь (40 % Ni)	10	Фенольний гетинакс	0,29
Листова електротехнічна сталь:		Дерево	0,1...0,3
вздовж волокон	65	Папір	0,13
поперек волокон	1	Поліетилен	0,51
Трансформаторна сталь:		Полістирол	0,17
вздовж волокон	25	Полівінілхлорид	0,16
поперек волокон	0,5	Фарфор	1,21
Золото (чисте)	310	Кераміка ($A1_2O_3$ + глина)	0,46
Мідь (99,9%)	390	Цегла червона	0,77
Мідь (99%)	360	Вугілля деревне	0,074
Латунь	110	Вода при температурі	
Срібло (чисте)	456	10 °С	0,575
Срібло (технічне)	410	30 °С	0,618
Цинк	110	50 °С	0,647
Свинець	34	Трансформаторне мастило	0,16
Олово	64	Повітря при температурі:	
Константан	23	10 °С	0,025
Ртуть	10	50 °С	0,028
		70 °С	0.03

Неметали (*діелектрики)* є протилежністю металам: основною є теплопровідність коливань та хвиль, $\lambda_e << \lambda_s$; вільними електронами діелектрики не володіють, хіба що наявні електрони домішок, частка яких мізерно мала. Для них відсутня залежність поміж тепловою провідністю та електричною. *Напівпровідники* середньо проводять тепло. Для *пластмас* теплопровідність на кілька порядків менша від теплопровідності металів, вони є добрими теплоізоляторами.

Значення λ знаходиться у великій залежності від способу спеціальної обробки матеріалів. Так, спінювання матеріалів значно понижує λ, а додавання відповідних наповнювачів та армування підвищує λ.

Теплопровідність *дистильованої* (деіонізованої) води дуже мала, як і льоду. Теплопровідність повітря також мала. Саме тому ефективність інрфачервоних нагрівників, які передають тепло активного елемента у зону нагріву через випромінювання, дуже висока.

4.5.4.2. Теплове випромінювання

Закони випромінювання. Нагріті тіла випромінюють електромагнітні хвилі. Це випромінювання здійснюється за рахунок перетворення енергії теплового руху частинок тіла в енергію випромінювання. Передача енергії тепловими потоками відбувається за рахунок електромагнітних коливань з довжиною хвилі λ = 0,4 – 40 мкм. Відповідно, для світлових променів λ = 0,38 ÷ 0,76 мкм, для інфрачервоних λ = 0,8 ÷ 40 мкм. Вважається, що теплове випромінювання – це електромагнітне випромінювання в інфрачервоні області спектра; підлягає в основному тим же самим фізичним закономірностям, що й випромінювання у видимому діапазоні. Для ідентифікації теплової енергії, що переноситься електромагнітним випромінюванням, введено термін «*променистa енергія*».

Джерелом теплового випромінювання є нагріте тіло з довільною поверхнею, що розділяє це тіло та простір оточення. Теплові промені можуть як поглинатися об’ємом тіла, долаючи границю розділу ззовні, так випромінюватись тілом назовні. Правило *Прева*: якщо два тіла при одній і тій самій температурі поглинають різну кількість енергії, то їх теплове випромінювання при цій же температурі мусить відрізнятися. Взаємодія падаючих променів з тілом описується законом збереження енергії випромінювання:

$$A^* + R^* + D = 1. \qquad (4.5.12)$$

Тут: A^* – доля поглинутої тілом енергії, R^*– відбита енергія границею розділу, D – енергія, що пройшла через тіло при направленому потоці.

Граничними є випадки:

$A^* = 1, R^* = 0, D = 0$ – чорне тіло (тільки поглинання);

$R^* = 1, A^* = 0, D = 0$ – дзеркальне тіло (тільки відбивається);

$D = 1, A^* = 0, R^* = 0$ – діатермічне тіло (тільки проходження променів).

Примітка. Знак (*) указує, що ці літери стосуються оптичного випромінювання; літерам без індексів в даному опосумі присвоєне інше розуміння.

Визначення «чорне» і «дзеркальне» тут характеризують тільки внутрішні властивості тіл, їх не слід ідентифікувати з фарбуванням чи якістю поверхні.

Енергетичні властивості теплового випромінювання сформульовані чотирьома фізичними законами:

1. Закон Кірхгофа;
2. Закон Планка;
3. Закон Стефана–Больцмана;
4. Закон зміщення Віна.

Розглянемо їх.

Закон Кірхгофа. Цей закон встановлює зв'язок поміж випромінювальною $E_{\nu,T}$ та поглинаючою здатністю $A_{\nu,T}$ деякого тіла.

Випромінювальна здатність $E_{\nu,T}$ *(Дж/м²)* є спектральною характеристикою теплового випромінювання тіла, залежить від частоти та температури тіла, а також від його матеріалу, форми та геометричного стану поверхні. Величина $E_{\nu,T}$ чисельно дорівнює поверхневій густині потужності теплового випромінювання тіла в інтервалі частот одиничної ширини:

$$E_{\nu,T} = {dW}/{d\nu}\,. \tag{4.5.13}$$

Поглинаюча здатність $A_{\nu,T}$, або монохроматичний коефіцієнт поглинання тіла свідчить, яка частка енергії, що падає на одиницю площі поверхні тіла за одиницю часу в одиничному інтервалі частот, поглинається тілом:

$$A_{\nu,T} = {W_{\text{погл}}}/{W_{\text{пад}}}. \tag{4.5.14}$$

Тут $W_{\text{погл}}$ – енергія, що поглинається тілом, а $W_{\text{пад}}$ – та енергія, що впала на його поверхню.

Як бачимо, $A_{\nu,T}$ – величина безрозмірна. Вона залежить, окрім частоти випромінювання та температури тіла, від форми та стану його поверхні та матеріалу.

Диференційна форма закону Кірхгофа встановлює відношення поміж випромінювальною та поглинальною здатністю:

$${E_{\nu,T}}/{A_{\nu,T}} = \varepsilon_{\nu,T.}. \tag{4.5.15}$$

Під $\varepsilon_{\nu T}$ розуміють випромінювальну здатність тіла.

Тіло називається *абсолютно чорним (АЧТ)*, якщо воно при довільній температурі повністю поглинає електромагнітне випромінювання, що падає на нього, тобто $A_{\nu,T} = 1$. Реальні тіла не є абсолютно чорними, найбільш повно цьому поняттю відповідає невеликий отвір деякої порожнини, покритої всередині ацетиленовою сажею, через який направляється зовнішнє випромінювання. Ступінь відмінності реального тіла від абсолютно чорного оцінюється коефіцієнтом сірості, який змінюється в межах $\{0 \div 1\}$, або ж чорноти – $\{1 \div 0\}$.

У практиці змістовною є інтегральна форма цього закону, де інтегрування проводиться по всьому інтервалу частот. До прикладу, інтегральна випромінювальна здатність ε_T абсолютно чорного тіла:

$$\varepsilon_T = \int_0^\infty \varepsilon_{\nu T} d\nu. \qquad (4.5.16)$$

Формула (4.5.16) представляє закон Кірхгофа у інтегральні формі.

Формула Планка. З енергетичної точки зору випромінювання *АЧТ* еквівалентне випромінюванню системи нескінченої кількості гармонійних осциляторів, які не взаємодіють один з одним. Такі системи називають *радіаційними осциляторами*. Макс Планк, визначний німецький фізик, сформулював квантову теорію світла, відповідно до якої енергія радіаційного осцилятора з власною частотою *ν* може набувати лише визначених дискретних значень – квантових, які відрізняються на ціле число елементарних порцій – квантів енергії:

$$\varepsilon_0 = h\nu; \qquad (4.5.17)$$

$h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ *дж·с* – постійна Планка.

Формула Планка для випромінювальної здатності *абсолютно чорного тіла*:

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \qquad (4.5.18)$$

Отже, $\varepsilon_{\nu,T.}$ описує густину розподілу енергії в спектрі випромінювання *АЧТ* при довільних температурах, що демонструється на рис. 4.5.3.

Закон Стефана – Больцмана. Встановлює величину інтегральної випромінювальної здатності *АЧТ* в залежності від його абсолютної температури *Т (фізичний зміст)*:

$$\varepsilon_T = \sigma T^4, \qquad (4.5.19)$$

де *σ – постійна Стефана–Больцмана*, яка дорівнює $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ *вт/м град*^{4}.

Геометричний зміст E_T – це площа, яка обмежується кривою спектральної густини випромінювання *АЧТ* (рис. 4.5.3) [38], нагрітого до температури $T\,°_i$, *К*, і віссю абсциси *λ*.

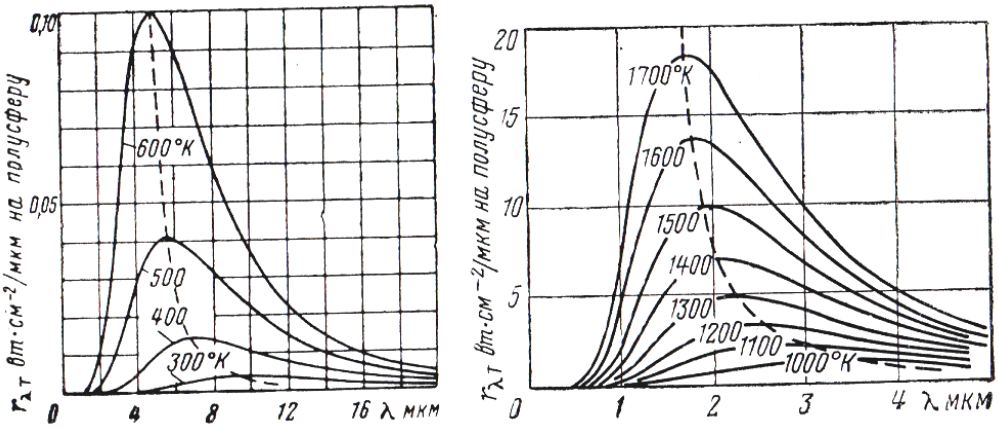


Рис. 4.5.3. Густина розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла:
штрихові криві – закон зміщення Віна

Технічний зміст E_T – це інтегральна випромінювальна здатність одиниці площі нагрітого тіла з врахуванням його коефіцієнта чорноти α:

$$E_T = \alpha\sigma T^4. \qquad (4.5.20)$$

Значення ступеня чорноти α для деяких матеріалів наводяться у табл. 4.5.2; обернена величина ступеня чорноти – ступінь його сірості.

Таблиця 4.5.2

Ступінь чорноти α для деяких матеріалів

Матеріал	**Температура, ºС**	**α**
Алюміній полірований	50 – 500	0,04 – 0,06
Сталь листова оцинкована	50	0,1
Сталь – листовий прокат	50	0,56
Сталь листова окислена	500	0,98
Чавун з необробленою поверхнею	50	0,81
Асбест (картон)	20	0,96
Цегла шамотна	1000	0,75
Цегла червона шорстка	20	0,88 - 0,93
Скло	20 – 200	0,91 – 0,94
Сажа (лампа гасова)	20 – 400	0,95
Лак чорний матовий	40 – 100	0,96 – 0,98
Лак білий	40 – 100	0,80 – 0,95
Фарба олійна різних кольорів	100	0,92 – 0,96
Чорний оксамит	До 50	0,98 – 0,99

Отже, за законом *Стефана–Больцмана,* відповідно до формули (4.5.20), *інтегральна випромінювальна здатність* нагрітого тіла пропорційна четвертому степеню абсолютної температури цього тіла, його ступені чорноти та коефіцієнту Стефана–Больцмана σ.

Закон зміщення Віна. Максимум випромінювальної здатності та довжина хвилі (частота коливного процесу), на яку припадає цей максимум, пов'язані співвідношенням:

$$T\lambda_{\text{мах}} = 2898\ [\text{мкм} \cdot \text{град}]. \qquad (4.5.21)$$

Тут *T, K* – температура нагріву тіла, що випромінює світлову радіацію.

Отже, закон зміщення Віна пояснює кольорові асоціації нагрітих тіл. Так, прості розрахунки показують, що спектр більш нагрітих тіл зміщується у фіолетовий напрям, а менш нагрітих – у червоний.

Проведемо деякий коментар даних таблиці 4.5.2. Викликає деяке здивування щодо лако-фарбових матеріалів. Бачимо, що ступінь чорноти α для лаку чорного та лаку білого мало відрізняються.

Пояснення цьому знайдемо на рис. 4.5.4 [1], де показаний спектральний хід випромінювальної здатності чорної та білої емалевих фарб.

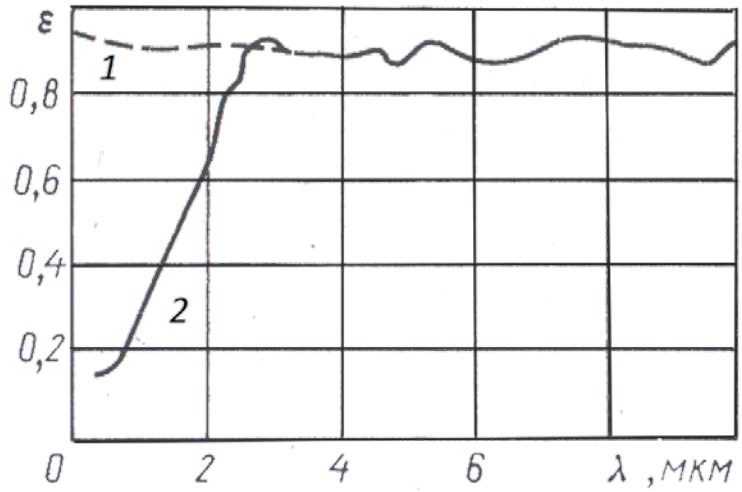


***Рис. 4.5.4. Спектральна залежність випромінювальної здатності емалевих фарб*:**
1 – біла; 2 – чорна

Відмінність у випромінювальній здатності спостерігається лише у видимій та ближній інфрачервоній областях спектра, Якщо провести інтегрування ε(λ) чорної фарби та білої по всьому спектральному діапазону (роздільно), тобто від 0 і до ∞, а потім провести нормування отриманих значень до інтегральної випромінювальної здатності, то очевидно, що отримані значення будуть мало відрізнятись, що ми і бачимо у відповідних даних табл. 4.5.2.

4.5.4.3. Конвекція

Це процес направленого руху молекулярних шарів рідин або газів, який здійснюється самовільно – *вільна конвекція*, або з примусом – *вимушена конвекція.* Вільна конвекція здійснюється під впливом двох причин:

1) зміна ваги одиниці об’єму речовини (густини) при її нагріванні або охолодженні: при нагріванні густина зменшується, при охолодженні – зростає;

2) наявністю сил тяжіння: нагріті шари як більш легкі виштовхуються наверх, холодні опускаються вниз; ці процеси підлягають дії двох фізичних законів: закону всесвітнього тяжіння Ньютона та закону виштовхування Архімеда.

Вільна конвекція виникає внаслідок нерівномірно нагрітих частин технічної системи. Вимушена конвекція забезпечується використанням спеціальних засобів, які створюють направлений рух рідин або газів (помпи, вентилятори).

Для теплового потоку, який передається конвекцією між стінкою і оточенням, використовується те саме, що й для розглянутих вище теплових процесів, співвідношення (4.5.1). Перепишемо його у такій формі:

$$\Phi_{k12} = \alpha_k A \Delta\theta_{12},$$

де α_k – коефіцієнт тепловіддачі; $\Delta\theta_{12}$– різниця температур поміж нагрітим тілом та оточенням (повітря, рідина, газ), що омиває нагріте тіло; A – площа контакту нагрітого та охолодженого тіла.

Коефіцієнт тепловіддачі α_k залежить від багатьох факторів, а саме: температури стінки корпусу θ_1, температури навколишнього середовища θ_2, теплопровідності λ, швидкості потоку w, питомої теплоємності c_p густини ρ потоку газу (повітря), динамічної в'язкості η, температурного коефіцієнта об'ємного розширення β, прискорення вільного падіння g, висоти стінки h, форми стінки тощо.

Визначення коефіцієнта тепловіддачі у більшості випадків практично неможливе, тому знайшли застосування експериментальні методи. У теплотехніці такі дослідження проводять на моделях невеликих розмірів, а результати переносяться на промислові установки. Необхідною умовою такого перенесення є схожість моделей і установок; для дослідження цієї схожості використовується *теорія схожості*.

Примітка. З поняттям схожості ми вперше зустрічаємось у геометрії, де розглядаються умови схожості геометричних фігур.

У основі схожості теплової апаратури лежить геометрична схожість каналів апарата та його моделі, по яких протікає рідина або газ, матеріалу виготовлення. Окрім цього, схожість процесів конвективного обміну забезпечується тотожністю названих вище факторів залежності коефіцієнта тепловіддачі.

Сформульовані *критерії схожості*, що носять назву імен вчених, які розробили методики розрахунків, а саме:

Нусельта: $$\mathrm{Nu} = \alpha_k l/\lambda_f, \quad (4.5.22)$$

Грасгофа: $$\mathrm{Gr} = l^3 g\beta\Delta\theta/\nu_f, \quad (4.5.23)$$

Прандтля: $$\mathrm{Pr} = \nu_f/a_f, \quad (4.5.24)$$

Рейнольдса: $$\mathrm{Re} = wl/\nu_f. \quad (4.5.25)$$

Критерій Нусельта (4.5.22) визначає інтенсивність конвективного обміну на межі «стінка – рідина». Чим інтенсивніше проходить цей теплообмін, тим більше число Nu і тим більший коефіцієнт тепловіддачі α_k, *м² /с*; l *– визначальний* розмір, який встановлює розвиток процесу теплообміну, *м*; λ_f – теплопровідність рідини, *Вт/(м·К*).

Критерій Грасгофа (4.5.23) встановлює співвідношення підйомної сили, спричиненої різницею густин холодної та нагрітої рідин, та сил молекулярного тертя. Отже, число Gr характеризує інтенсивність вільного руху рідини: β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення, *К*$^{-1}$; g – прискорення вільного падіння, *м /с*^{2}; $\Delta\theta$ – температурний напряг, *°С*; ν – кінематична густина рідини, *м*^{2}*/с*.

Число Прандтля (4.5.24) визначає фізичні властивості рідини. В правій частині обидві величини – параметри стану: a – тепературопровідність рідини, [м^2 /с]; ν – кінематична густина рідини, [м^2 /с]). Число Прандтля – безрозмірна величина.

Число схожості Рейнольдса (4.5.25) визначає характер руху рідини: турбулентний чи ламінарний; тут w – середня швидкість рідини, [м/с],

Використавши вищенаведені позначення, коефіцієнт тепловіддачі, необхідний для розрахунків теплових потоків за (4.5.21), запишеться:

$$\alpha_k = f(Nu, Gr, Hr, Re) \tag{4.5.26}$$

При наявності розрахованих значень коефіцієнтів Gr, Hr, Re у спеціальній літературі приводяться формули для коефіцієнта Нусельта.

Наприклад, для вільної конвекції критеріальне рівняння має такий вигляд:

$$\text{Nu} = k(Gr\,Pr)^n. \tag{4.5.27}$$

Тут k – коефіцієнт, який визначається експериментально; показник степеня n залежить від виду потоку:

для ламінарного $n = 0{,}25$ при $5 \cdot 10^2 < Gr\,Pr < 2 \cdot 10^7$.

Критерій Нусельта для конвекції повітря при нормальному тиску у температурному діапазоні від 0 до 100º С для ламінарного потоку, що не зазнає опору:

$$\text{Nu} = 0{,}54\sqrt[4]{GrPr} \tag{4.5.28}$$

Для теплотехнічних розрахунків приладів у більшості випадків досить знання наближених значень коефіцієнта тепловіддачі α_k.

4.5.5. Тепловідвід з приладів

4.5.5.1.Постановка задачі

У практичних випадках знаходять застосування як всі три процеси перенесення теплоти, так їх комбінації, а саме:

1) конвективне перенесення, при якому сумісно беруть участь конвекція і теплопровідність (наприклад, при теплообміні поміж поверхнею твердої стінки і рідини, що її обмиває);

2) радіаційно-конвективний (наприклад, при перенесенні теплоти гарячими газами до стінки, яку вони обмивають, де одночасно з конвективним способом спостерігається перенесення тепловим випромінюванням);

3) теплопередача (при перенесенні тепла від однієї рідини до іншої через теплопровідну стінку).

Конкретні реалізації перенесення теплоти зводяться до таких способів:

- контактний тепловий;
- випромінювальний;
- природний повітряний;
- примусовий повітряний;
- примусовий рідинний;
- примусовий випаровуванням.

За основний показник вибору способу охолодження береться значення густини теплового потоку q, що розсіюється з поверхні об'єкта охолодження, яка розраховується за формулою:

$$q = \frac{P_\Sigma}{A_n} K_p. \qquad (4.5.29)$$

Тут: P_Σ – сумарна потужність розсіяння поверхнею об'єкта; A_n – площа поверхні теплообміну; K_p – коефіцієнт, який враховує зовнішнє оточення; при атмосферному тиску K_p =1.

Оскільки прилад розташований у замкнутому корпусі (кожусі), то його поверхня в більшості випадків матиме однакову температуру, тобто ізотермічну. Площа A_n, яка входить у формулу, не дорівнює істинній площі поверхні кожуха $A_{\text{іст}}$, а враховує заповнення об'єму корпусу компонентами з використанням коефіцієнта заповнення $K_{зп}$, який дорівнює відношенню об'єму, який зайнятий компонентами приладу, до повного об'єму.

Отже, $\text{К}_{\text{зп}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{V}$, де V_i – об'єм i – компоненти, n –кількість компонент, V – об'єм корпусу. Тоді $A_{\text{п}} = A_{\text{іст}} K_{\text{зп}}$.

В основі розрахунків теплового балансу лежить визначення потужності розсіювання енергії приладом, яка обчислюється за формулою (4.5.30):

$$P_\Sigma = P_{\text{Сп}} - P_{\text{Кор}} = \Phi_\lambda + \Phi_S + \Phi_K. \qquad (4.5.30)$$

Рекомендації щодо вибору способу охолодження зведені в діаграму на рис. 4.5.5 [24].

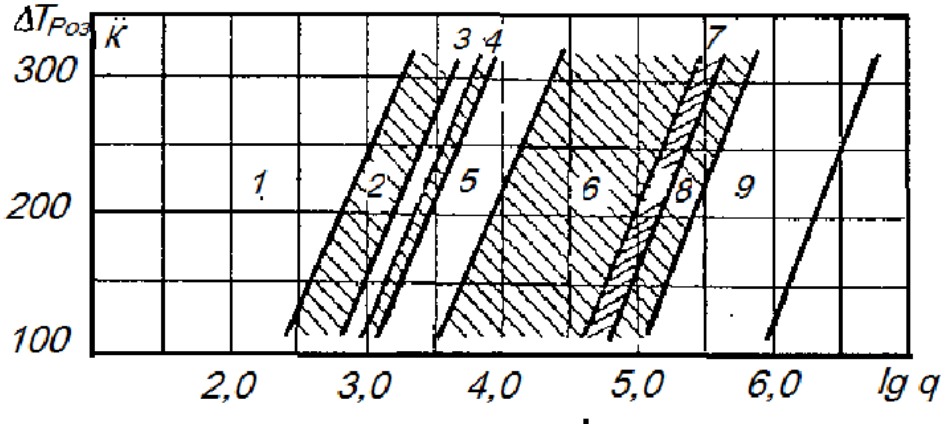


Рис. 4.5.5. Області доцільного використання способів охолодження:

1– природне повітряне;
2 – неповне використання природного і штучного охолодження;
3 – примусове повітряне;
4 – можливе використання повітряного і рідинного охолодження;
5 – примусове рідинне;
6 – можливе застосування примусового рідинного і природного випаровувального охолодження;
7 – можливе застосування примусового рідинного, примусового і природного випаровувального охолодження;
8 – можливе застосування природного і примусового випаровувального охолодження;
9 – примусове випаровувальне.

Діаграма розрізняє області двох типів: незаштриховані, та заштриховані.

Області першого типу (незаштриховані) стосуються таких способів охолодження: 1 – природне повітряне; 3 – примусове повітряне; 5 – примусове рідинне; 9 – примусове випаровувальне.

Області другого типу (заштриховані): 2 – неповне використання природного і штучного охолодження; 4 – можливе використання повітряного і рідинного охолодження; 6 – можливе застосування примусового рідинного і природного випаровувального охолодження; 7 – можливе застосування примусового рідинного, примусового і природного випаровувального охолодження.

Отже, тепловий розрахунок розпочинається з формулювання рівняння теплового балансу, яке дозволить визначити величину сумарної енергії розсіювання. Далі необхідно побудувати еквівалентну теплову схему, яка має відображати способи передачі теплового потоку від окремих елементів та вузлів приладу за межі корпусу. Однак у випадку складного теплообміну такий шлях не завжди реалізується внаслідок значних методичних та математичних ускладнень. Перспективне застосування аналогій між тепловими та електричними величинами. Поверхню кожуха замінюють ізотермічними поверхнями із середньо поверхневою температурою, що дозволяє оцінити можливий перегрів, а це в свою чергу дає можливість вибрати ефективну комбінацію способів теплового захисту.

4.5.5.2. Тепловідвід теплопровідністю

Розрізняють контактну теплопровідність та теплопровідність несучих конструкцій. Контактна теплопровідність визначається *контактним тепловим опором*, який залежить як від фізичних властивостей матеріалів контакту, так і від мікрогеометрії поверхонь контакту; зі зростанням мікрогеометрії тепловий опір також зростає.

Контактний тепловий опір ($см^2 \cdot К/Вт$) деяких пар такий:

мідь – алюміній: 0,08;

мідь – мідь: 0,1;

мідь – латунь: 0,18;

мідь – алюмінієвий сплав Д 16: 0,2;

сплав Д16 – сплав Д16: 0,25;

сталь – мідь: 0,8;

сталь – сплав Д16: 1,2;

сталь – сталь: 2,5;

метал – фарба – метал: 20,0.

Якщо потрібно ізолювати контактну посадкову площину транзистора, то тепловий опір контакту збільшується на величину теплового опору ізоляційної прокладки.

Тепловідвід та охолодження електронних компонент здійснюються тепловідвідними шинами, розташованими безпосередньо під корпусами ІС. На рис. 4.5.6 показаний монтаж компонентів на тепловідвідній шині.

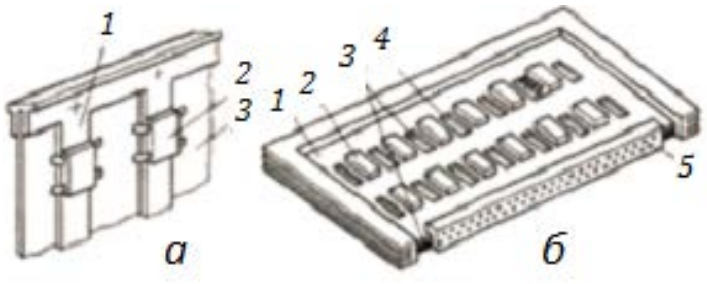


Рис. 4.5.6. Охолодження інтегральної схеми (ІС) тепло відвідними шинами:

а – осердя з теплостічними шинами і торцевою накладкою;
б – осердя з суцільним тепловідводом і перфораційним радіатором;
1 – елементи тепловідводу; 2 – ІС; 3 – друкована плата;
3 – вікна в тепловідвідній шині; 5 – розетка з'єднувача

Теплопровідні шини застосовуються лише у спеціальних випадках, при великих потужностях споживання та розсіяння.

Для поліпшення тепловідводу в місцях теплових контактів наносяться теплопровідні пасти, які збільшують площу теплового контакту внаслідок заповнення впадин мікронерівностей. Зменшується теплопровідність також і при докладанні контактних зусиль при монтажі компонента. На рис. 4.5.7 демонструється монтаж безкорпусних компонентів на несучі конструкції.

У низці випадків електронні компоненти у пластмасовому корпусі містять вбудовані тепловідвідні смужки, що приєднуються до шин плати, які в свою чергу приєднуються до корпусу електронного виробу через металеві шини.

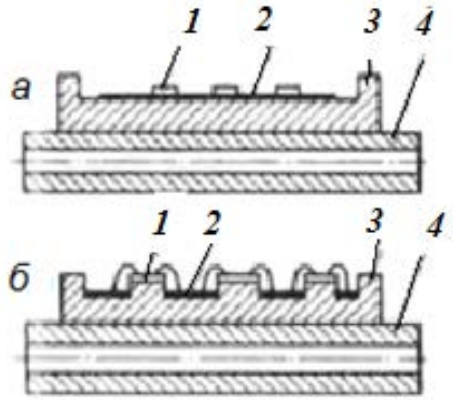


Рис. 4.5.7. Відвід теплоти від безкорпусних компонентів, які установлюються на електронну плату (а) або на виступи підкладки (б):

1 – компонент;
2 – поліамідна плата;
3 – підкладка з алюмінію;
4 – охолоджувана рідиною плита

4.5.5.3. Тепловідвід випромінюванням

У технічних розрахунках представлення закону Стефана-Больцмана дещо відрізняється від того, що прийнятий фізичній літературі. Отже,

$$\Phi = \alpha C_S A(T/100)^4. \qquad (4.5.31)$$

В такому представленні постійна Стефана–Больцмана C_S позбулася високих порядків, які потрапили за дужки з четвертою степеню, і складає:

$$C_S = 5{,}67 \text{ вт/м} \cdot \text{град}^4.$$

Нехай теплообмін випромінюванням здійснюється поміж двома плоско паралельними стінками *1*, *2*, відстань між якими невелика в порівнянні з їх протяжністю (рис. 4.5.8). Середовище поміж стінками теплопрозоре, температури стінок T_1 і T_2, причому $T_1 > T_2$.
Площі стінок поверхонь $A_1 = A_2 = A$.

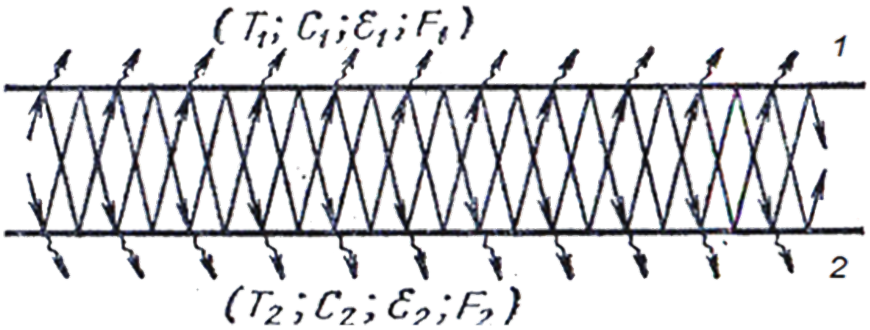


Рис. 4.5.8. Схема теплообміну між двома плоскими паралельними стінками

Для проведення розрахунків будується спеціальне співвідношення на основі узагальненої формули (4.5.1), відповідно до якої тепловий потік з поверхні *1* як більш нагрітої до менш нагрітої *2* буде:

$$\Phi = \alpha A \Delta\theta = a_\Sigma \phi_{1,2} f_{12} A \Delta\theta_{12}. \qquad (4.5.32)$$

Тут $\alpha = a_\Sigma \phi_{1,2} f_{12}$ – коефіцієнт теплопередачі, де $a_\Sigma = \frac{2}{1/a_1 + 1/a_2}$ – зведена ступінь чорноти двох стінок; $\phi_{1,2}$ – коефіцієнт опромінювання; f_{12} – температурна функція випромінювання. $\Delta\theta_{12}$ – різниця температур поверхонь, *К*.

Під температурною функцією випромінювання, беручи за основу (4.5.32), розуміють:

$$f_{12} = C_S[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]/\Delta\theta_{12}. \qquad (4.5.33)$$

$C_S = 5{,}67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$ – постійна Стефана–Больцмана у технічному представленні*.

* фізична величина: універсальна постійна $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ *вт/м^2 ·град^4*.

Розрахунки функції f_{12} у графічній формі подані на рис. 4.5.9 [24].

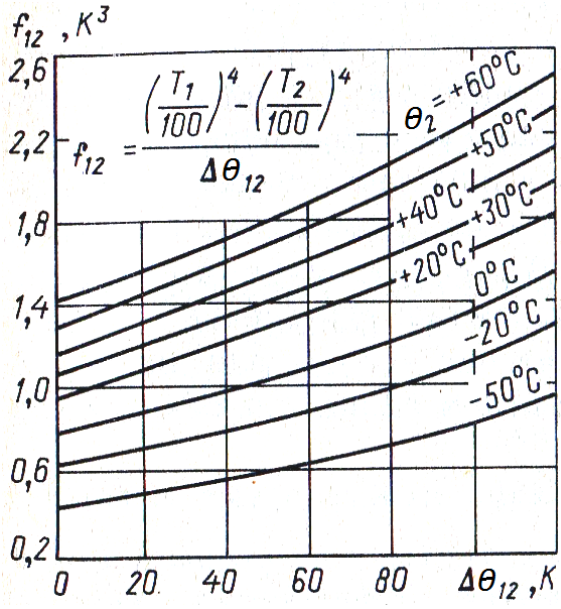


Рис.4.5.9. Температурна функція випромінювання

Інтегральна випромінювальна здатність одиниці площі, згідно з формулою (4.5.32), така:

$$\varepsilon^*_T = \alpha_\Sigma C_S f_{12} \Delta\theta_{12} \qquad (4.5.33)$$

Для розрахунків передачі тепла з поверхні A_1 на поверхню A_2 , які розташовані на значній відстані, необхідне використання так званого коефіцієнта опромінювання $\varphi_{1,2}$ (рис. 4.5.10) , який показує частку світлового потоку, що потрапляє з однієї поверхні на іншу в залежності від форми та відстані між ними (рис. 4.5.10) [24].

З ходу залежностей бачимо, що при збільшенні відстані між площинами коефіцієнт $\varphi_{12} \to 0$, і навпаки, при зменшенні цієї відстані параметр x зростає, а коефіцієнт $\varphi_{12} \to 1$; інакше, якщо площини розташовані близько одна до одної, то вся теплова енергія перейде з більш нагрітої до менш нагрітої, що очевидно.

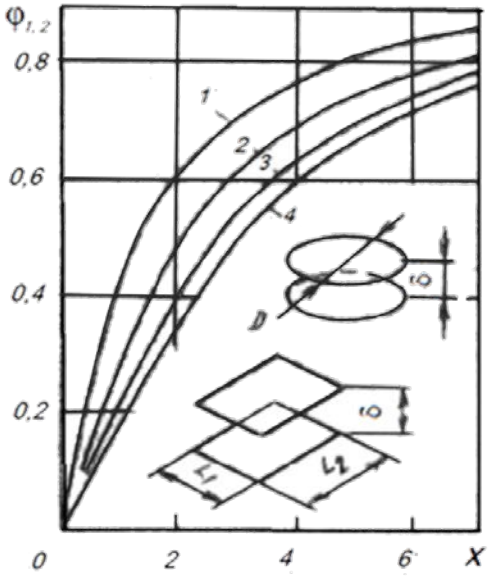


Рис. 4.5.10. Залежність коефіцієн опромінення $\varphi_{1,2}$ для поверхонь рі конфігурації від параметра x; визначається дільником $x = \frac{L}{\delta}$ д прямо сторонніх фігур), або ж x D/δ для круглих:

1 – смуга (L2 /L1 >>1);
2 – прямокутник (L2 /L1 = 2) ;
3 – квадрат (L2 = L1);
4 – круг

4.5.5.4. Тепловідвід конвекцією

Найпростішим способом охолодження є використання вільної конвекції повітря всередині приладу з подальшим виведенням його за межі корпусу. У закритому внутрішньому об'ємі приладу утворяться замкнуті, найчастіше дуже складні повітряні потоки, обумовлені геометрією цього об'єму і перепадами температур у ньому. У вузьких щілинах між компонентами шириною *менше 5 мм* у закритому об'ємі вільна конвекція практично не відбувається, а тільки теплопередача. Ось чому для поліпшення теплообміну відстань між окремими деталями та вузлами має складати більше 5-ти *мм.* У закритому корпусі тепловіддача від нагрітих елементів до його стінок відбувається за рахунок конвекції, теплопередачою через теплопровідні шини, і частково випромінюванням. Для поліпшення теплопереносу конвекцією чинять двояко. По-перше, використовуються перфораційні отвори, по-друге, застосовують вимушену конвекцію. Перфораційні отвори виготовляють трьох типів: 1) *жалюзійні*, 2) *щілинні*, 3) *круглі*. Жалюзійні запобігають прямому попаданню сторонніх предметів ззовні всередину корпусу; переважно їх розташовують зверху корпусу, щілинні – по вертикальним сторонам, а круглі – знизу корпусу. Для циркуляції повітря компоненти приладу розташовують рядами, причому з вертикальним розташуванням плат, що забезпечує формування вентиляційних каналів. Зрозуміло, що у приладі, корпус якого має вентиляційні отвори, конвекція більш інтенсивна. Для характеристики вентиляції використовують поняття коефіцієнта вентиляції (ψ, %), а саме

$$\psi = (2A_L/A_\Sigma)100\%, \qquad (4.5.34)$$

де A_L– площа ефективного повного поперечного перерізу вентиляційних отворів; A_Σ – повна загальна площа невентильованого корпусу. Коефіцієнт вентиляції може складати від 2 до 25%.

Формула (4.5.34) важлива для розрахунків конвекційного обміну. Використовуючи феноменологічний підхід, встановлений такий наближений розв’язок:

$$0{,}9P_\Sigma = (\alpha_k A_\Sigma \Delta\theta)\sqrt{\psi}. \qquad (4.5.35)$$

Знаючи потужність теплового розсіювання P_Σ (ф-ла 4.5.6), повну площу поверхні корпусу A_Σ, допустимий перепад температури між внутрішнім об’ємом та оточенням корпусу $\Delta\theta$, можна оцінити коефіцієнт теплопередачі конвекцією α_k, що дає можливість оцінити стан теплового балансу приладу.

При високій щільності компоновки елементної бази вільної конвекції недостатньо, тому використовують примусову вентиляцію з використанням вентиляторів. При вільній конвекції – $\alpha_K = 5\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, при вимушеній конвекції $\alpha_K = 20 \div 120\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Умовою теплової віддачі при вимушеній конвекції є наявність потрібних повітряних охолоджуючих потоків поміж елементами приладу. Для формування цих потоків необхідно передбачити герметизовані канали і з їх допомогою запобігти підсмоктуванню стороннього повітря.

Розрізняють *притокову* та *витяжну* вентиляції. При притоковій вентиляції вентилятор розташовують ззовні внизу корпусу, повітря надходить ззовні у прилад.

При витяжній вентиляції вентилятори встановлюють усередині корпусу уверху. В такому разі стороннє повітря, яке надходитиме з нещільностей, приведе до зниження об'ємного потоку повітря в нижній частині, що зменшує ефективність вентиляції. В деяких випадках використовується комбінація притоку та витяжки: в нижній частині приточний принцип, а у верхній – витяжний.

4.5.5.5. Тепловідвід з використанням термоелектричних ефектів

З термоелектричних ефектів (Зеєбека, Пельтьє, Томпсона) для охолодження електронних приладів практичне значення має ефект Пельтьє (відкритий у 1834 р. французьким фізиком Ж.Ш.А. Пельтьє). У 30-ті роки XX сторіччя радянський вчений А. Ф. Іоффе запропонував використати цей ефект для побудови термобатарей шляхом послідовного з'єднання напівпровідників *p*- і *n*-типу (рис. 4.5.11). Отже, при проходженні електричного струму через спряження 1, 2 різнотипних напівпровідників це спряження нагрівається або охолоджується в залежності від напрямку струму.

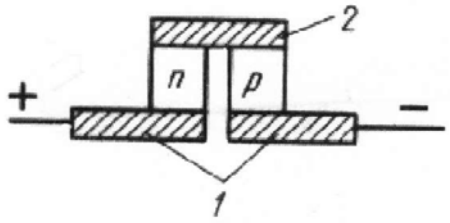


Рис.4.5.11. Ланка термобатареї:
1 – холодна сторона; 2 – нагріта сторона

При протіканні через елемент струму I на *холодному спаї* поглинається теплота

$$Q_x = Q_{Pt} - Q_{Dj} - Q_\lambda, \qquad (4.5.36)$$

Тут: $Q_{Pt} = \alpha_Z I \theta_F$ – тепло Пельтьє. Тут: α_z – коефіцієнт Зеєбека, тобто коефіцієнт термо-ЕРС, I – струм, що тече через перемичку з опором R, θ_F – температура холодного спаю; Q_{Dj} – джоулева теплота, що виділяється на опорі перемички; $Q_\lambda = (\lambda/\delta) A \Delta\theta$ – теплота, що передається від гарячого спаю до холодного за рахунок теплопровідності.

Баланс тепла у термоелементі в залежності від струму, що протікає, показаний на рис. 4.5.12.

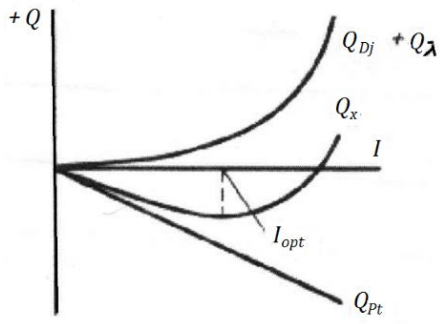


Рис. 4.5.12. Баланс тепла перемички термоелемента
(відповідно до формули 4.5.36)

Термобатарея може здійснювати як охолодження, так і нагрівання, в залежності від напрямку струму, що особливо важливо при роботі в режимі активного термостатування. Для підтримки низької температури однієї зі сторін термобатареї необхідно підтримувати задану температуру іншої, гарячої сторони, охолоджуючи її, наприклад, за рахунок конвекції.

Термоелектричні елементи працюють з дуже малими робочими напругами ($U < 1\text{В}$) , споживаючи при цьому великі струми ($\text{I} > 10\text{А}$).

4.5.5.6. Тепловідвід тепловими трубами

Одними з найбільш ефективних охолоджувачів є тепловідвідні пристрої, які називаються тепловими трубами. Теплова труба – пристрій, призначений для перенесення теплового потоку з одного кінця труби на інший за рахунок використання замкнутого випарно-конденсаційного циклу, заснованого на випарі рідини в зоні підведення теплоти, передачі теплоти з потоком пари, конденсації пари в зоні відводу теплоти і повернення рідини в зону підведення теплоти за рахунок капілярних або гравітаційних потоків.

Теплова труба (рис. 4.5.13) являє собою замкнуту вакуумну камеру, внутрішня поверхня якої облицьована капілярно-пористою структурою (гніт), який заповнений конденсатом робочої рідини.

Капілярно-пориста структура може бути виконана у вигляді металевої сітки, спечених кульок, метало- та скловолокна, системи каналів на внутрішній поверхні труби 1. Носій тепла – рідина, як-от вода, спирти, феноли, ацетон, аміак, інше. При температурах нижче 200 К як теплоносій використовують зріджені гази.
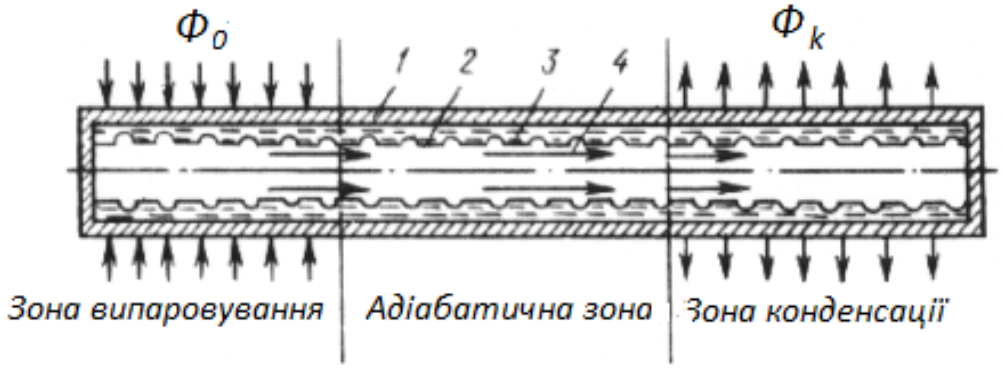


Рис. 4.5.13. Схема циліндричної теплової труби:
1– корпус; 2 – гніт; 3 – рідина у гноті; 4 – потік пару

Працює труба так. При підведенні теплового потоку $Ф_0$ до зони нагріву носій тут випаровується, пари надходять у зону адіабатичного розширення, в результаті чого відбувається різке охолодження з наступною конденсацією, що супроводжується виділенням потоку тепла $Ф_к$ через поверхню металевої труби в теплообмінник. Конденсований газ зріджується, але внаслідок перепаду температури повертається по капілярах назад до зони випаровування; цим самим забезпечується циклічність процесу. Отже, якщо розмістити ліву частину труби в об’єм з підвищеною температурою, відбудеться транспорт тепла, тобто тепловідвід.

Теплові труби можуть використовуватися при температурах від -273º до +2700º С, що обумовлює розмаїтість їхніх конструкцій. Вони працездатні у невагомості, мають великий терміном служби (16000 год для труб на воді), малу масу, високий ККД (близько 90%). Недоліком теплових труб є складність відтворення параметрів від екземпляра до екземпляра.

4.5.5.7. Розташування джерел тепла

Спеціальні дослідження щодо розташування джерел тепла та висоти корпусів приладів дозволили зробити такі висновки:

1) при розташуванні джерел тепла поблизу стінок, особливо верхньої кришки, їхні температури максимальні. Чим нижче встановлені джерела тепла, тим нижча їх температура. Очевидно, що причиною цьому є умови конвективного обміну між джерелом тепла та оточенням всередині приладу. Переваги розташування джерел тепла вверху – це збільшення розмірів більш холодних зон внизу;
2) у корпусах меншої висоти при тому ж об'ємі, що й у високих, температура джерел тепла, елементної бази, стінок корпусу приладів нижча, аніж у високих. «Камінний» ефект, тобто збільшення циркуляції повітря внаслідок різниці в густинах повітря, проявляється лише в корпусах не нижче *0,3 м*.

Прийнято, що джерела теплоти у приладі розташовані так, що вони забезпечують якомога рівномірне нагрівання приладу і його корпусу. При визначенні розмірів важливо знати, яка потужність P_Σ може бути відведена від приладу при його максимально допустимій температурі.

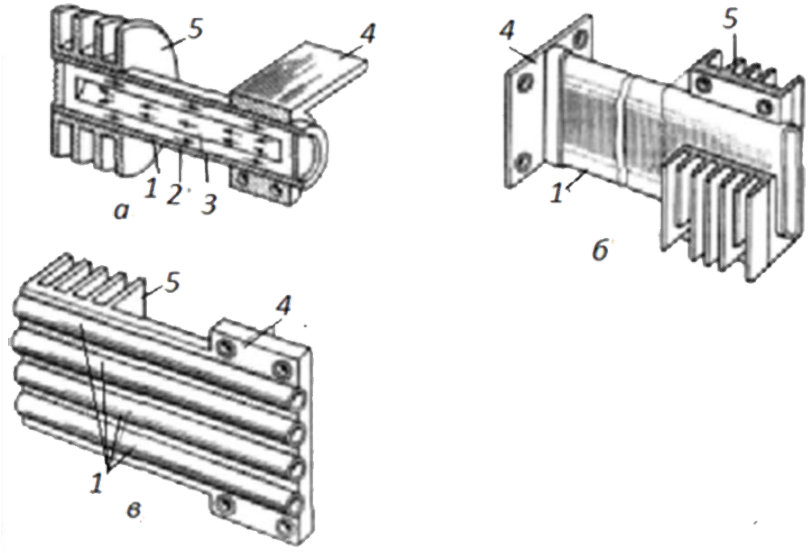


Рис. 4.5.14. Конструкції теплових труб:

а – перетин; б – трубка плоскої форми; в – група трубок;
1 – корпус трубки; 2 – капілярний матеріал; 3 – паровий канал;
4 – площадка для охолоджуваного вузла; 5 – радіатор охолодження

4.5.5.8. Радіатори

Радіаторами *називають* вироби, які забезпечують тепловідвід від гарячих зон за рахунок теплопровідності з подальшим залученням в процес обміну конвекції і випромінювання; цим забезпечується інтенсифікація теплообміну з навколишнім середовищем. Отже, цей конструктивний елемент залучає всі три фізичні процеси обміну тепла. Такі властивості зумовлені значним збільшенням площі контакту з оточенням унаслідок застосування ребристої зовнішньої форми.

За конструкцією розрізняють ребристі, штирові, жалюзійні й інші радіатори (рис. 4.5.15), виконані з мідних, алюмінієвих, магнієвих чи берилієвих сплавів. Для охолодження малопотужних напівпровідникових елементів застосовують також охолоджувальні скоби. Найбільш прості пластинчасті радіатори, які використовують як при природній, так і при вимушеній конвекціях. Однак вони менш ефективні, ніж штирові або ребристі, але значно технологічні за конструкціями.

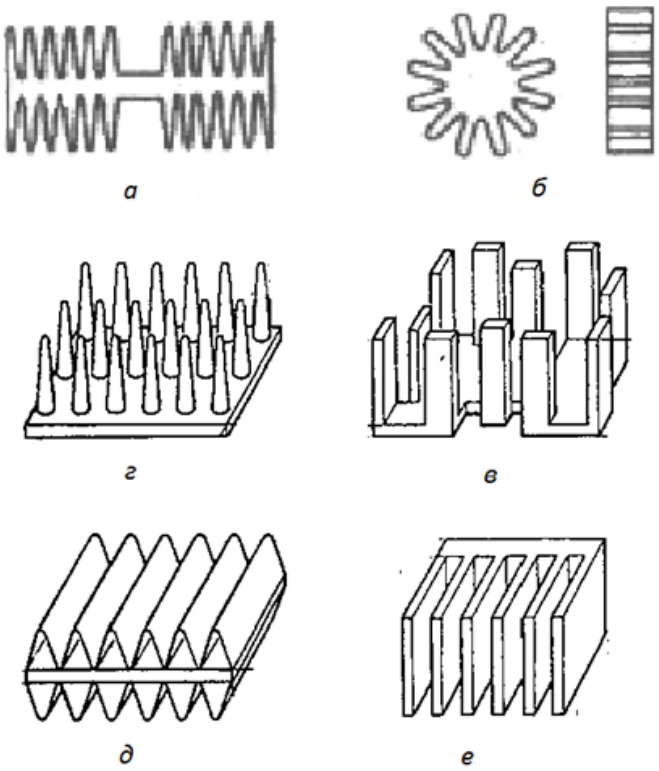


Рис. 4.5.15. Конструкції радіаторів:
а − ребристий двосторонній;
б − ребристий циліндричний;
в − штировий;
г − типу «краб»;
д − жалюзійного типу;
е − ребристий односторонній

4.6. Захист від механічних навантажень

[1, 3, 27, 34, 36]

4.6.1. Основні положення

На систему «прилад – місце установки» можлива дія механічних навантажень, зумовлених динамічними впливами у вигляді коливань і ударів, викликаних як зовнішніми, так і внутрішніми причинами. Під їх дією виникає деформація робочих

елементів, а також коливання суміжних з приладом об’єктів. Їх величина не повинна перевищувати задані значення. Для здійснення цього конструктивно виконується захист, метою якого є забезпечення виконання приладом заданої йому функції, підвищення точності, надійності і терміну служби приладів. Важливий також захист обслуговуючого персоналу від шуму і вібрацій (охорона праці та здоров'я).

Захист від цього здійснюється з допомогою демпфування, ізоляції та гасіння коливань, а також за допомогою монтажу додаткових мас до основної.

4.6.2. Джерела механічних навантажень

Механічні навантаження, які проявляються у вигляді коливань і ударів, негативно впливають як на навколишнє середовище, так і на роботу приладів при експлуатації та випробуванні, а також при їх транспортуванні. При цьому розрізняють *зовнішні* та *внутрішні* джерела коливань і ударів.

Зовнішні впливи. Коливання фундаменту при суміжній роботі штампувальних молотів, пресів або верстатів; вібрації, викликані рухом транспортних засобів унаслідок нерівності дорожнього полотна; поштовхи залізничного рухомого складу при маневруванні; випробувальні дії на вібростолах; коливання ґрунту і повітря при розвантаженнях сипучих матеріалів, аваріях під час експлуатації (перекидання, падіння).

Внутрішні джерела. Це рух поршнів у двигунах внутрішнього згоряння, незбалансованістю деталей машин, що обертаються, роботою механізмів поблизу резонансних частот, зв'язками рухомих деталей з нерухомими, неточністю виготовлення, монтажу та шпаринами в кінематичних парах та інше.

Датчики, вимірювальні прилади і випробувальні стенди, призначені для вимірювань вібраційних і ударних навантажень, дуже різноманітні як за принципом дії, так і за конструкціями.

4.6.3. Функції збудження, частоти збудження і власні частоти

Для математичного описання важливо, щоб реальні функції збудження могли бути наближено описані ідеальними. До ідеальних функцій (рис. 4.6.1) належать гармонійна, періодична, стохастична функції, а також функції, що описують процеси розбігу і вибігу, стрибкоподібне й удароподібне збудження. Перші три функції використовують для опису стаціонарних, інші – для нестаціонарних процесів. При цьому удароподібне збудження може мати вигляд функції прямокутної, напівсинусоїдальної, трикутної форми. Для дослідження системи можливе використання також послідовності ударно схожих збуджень.

Частоти збудження (частоти вимушених коливань) і власні частоти коливань механічних систем лежать в області від 0 до 10^6 Гц (рис. 4.6.2).

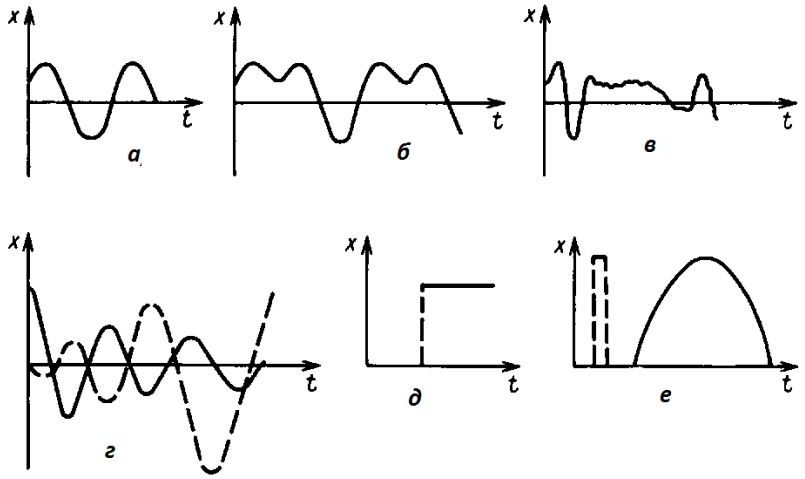


Рис. 4.6.1. Ідеальні функції збудження:

а) гармонійна; б) періодична; в) стохастична; г) така,
що описує розбіг або вибіг; д) стрибкоподібна; е) ударна

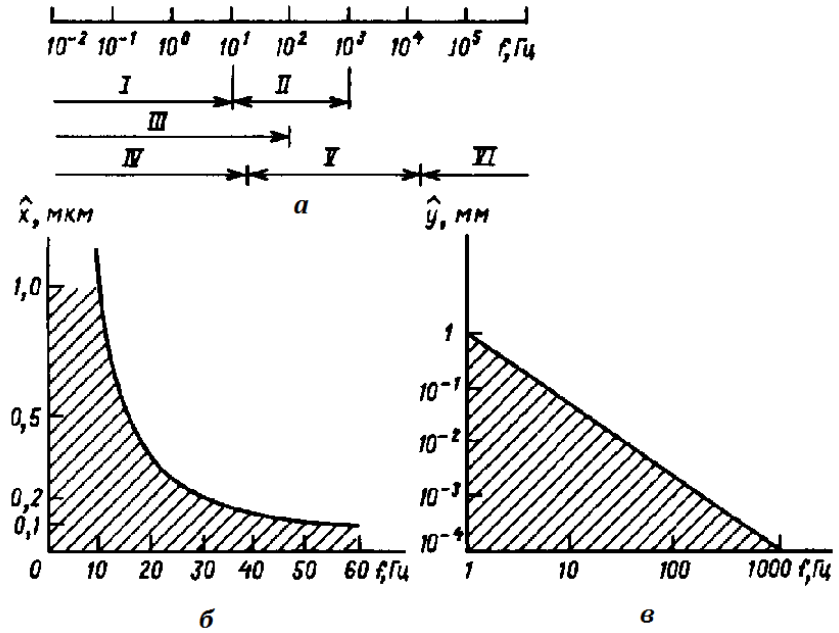


Рис. 4.6.2. Механічні коливання, які характерні для приладів:

***а* – частоти коливань:** I – ґрунту і споруд; II – власні частоти механічних елементів; III – такі, що розрізняються на дотик; IV – інфразвукових; V – звукових; VI – ультразвукових;

***б* – амплітуди вхідних величин** (коливання грунту і споруд);

***в* – амплітуди вихідних величин** (коливання конструктивних елементів і вузлів при гармонійних коливаннях)

Як приклад можна вказати діапазони частот коливань деяких характерних процесів: коливання ґрунту і будівель 10^{-2} – 10^{-1} Гц; коливання, відчутні за допомогою дотику, 10^{-1} – 10^{2} Гц; власні коливання більшості конструктивних елементів – від 10 до 10^{3} Гц; коливання, які чутні тілом людини – від 16 до $1{,}6\cdot10^{4}$ Гц; ультразвукові коливання – від $2\cdot10^{4}$ до 10^{6} Гц.

Величинами збудження можуть бути шлях, швидкість, прискорення, сила (при поступальному русі), кут, кутова швидкість, кутове прискорення або крутний момент (при обертальному русі).

У табл. 4.6.1 наведені власні частоти f_0 і добротність Q деяких конструктивних елементів і вузлів. При цьому слід пам'ятати, що ці значення дійсні тільки для дискретних коливальних систем і тільки для одного напрямку коливань. Як показує досвід, відношення власних частот коливань у взаємно перпендикулярних напрямках становить 0,5 – 2.

Таблиця 4.6.1

Власні частоти коливань, добротність деяких конструктивних елементів і вузлів

Конструктивні елементи і вузли	**f_0, Гц**	**Q**	**Довжина стеблини для пайки**
Резистори, що припаюються до друкованих плат	200 – 500	250; 60 – 120	10 – 30; 1 – 8
Конденсатори, що припаюються до друкованих плат	80 – 600	40 – 60; 20 – 40	15 – 20; 1 – 8
Електролітичні конденсатори: корпус прикріплений до конденсатора, коливання направлені перпендикулярно до корпусу	50 – 140	–	–
Транзистори і діоди, які припаяні до друкованих плат	100 – 400; 50	200	20; 35
Електронні лампи	100 – 200	–	–
Реле на друкованих платах:			
корпус	120	–	–
контактна група	350	–	–
Проводи (припаяні):		–	
неізольовані	200 – 1200	200	50 – 100
ізольовані	600	90	–
Кабелі, багатожильні гнучкі проводи	30 – 60	2 – 3	– –
Охолоджуючі і екрануючі пластини (Al товщиною 2 мм, змонтовані на друкованих платах)	40 – 80	–	– –
Друковані плати на напрямних (масою 60 – 120 г)	40 – 80	–	–
Гвинтові пружини в приладах	10 – 100	–	–
Плоскі пружини в приладах	50 – 500	–	–
Гумові амортизатори	30 – 300	20 000	–
Вузли в приладах та інші конструктивні елементи	50 – 500	20 – 200	–

4.6.4. Динамічна модель захисту технічних систем від коливань та ударів

Загальна схема динамічної моделі технічної системи (ТС), встановленої на фундаменті, показана на рис. 4.6.3. Система з масою m підлягає дії зовнішньої збуджуючої сили $F(t)$, яка змінюється за відомим законом (рис. 4.6.1). Технічна система розв'язана з базовим елементом (фундаментом) за допомогою віброзахисту, який включає в себе пружний елемент з коефіцієнтом жорсткості C та демпферний пристрій з коефіцієнтом демпфування k, головне призначення якого – це гасіння коливань об'єкта масою m, викликаних дією збуджуючої сили $F(t)$ з одночасним зменшенням вібраційної реакції $Z(t)$, яка передається на базовий елемент (або ж навпаки – вібрація фундаменту як фактор збудження *ТС* – рис. 4.6.3

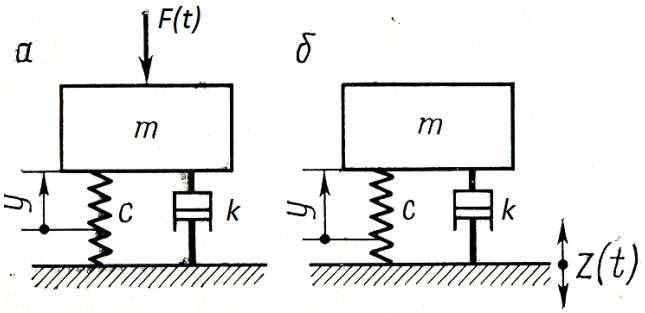


Рис. 4.6.3. Динамічна модель технічної системи:

а − збуджуюча сила $F(t)$ прикладена до об'єкта;
б − динамічна дія базового елемента за законом $Z(t)$

Кінетостатичне рівняння руху системи з масою m, очевидно, запишеться так:

$$F(t) = F_N + F_{St} + F_G. \qquad (4.6.1)$$

Тут: $\vec{F}_N = -ma\vec{e}$ – сила інерції Ньютона;

$\vec{F}_{St} = -kv\vec{e}$ – сила тертя Стокса (рух поршня у наповненому рідиною або газом при невеликих відносних швидкостях поміж ними);

$\vec{F}_G = -Cy\vec{e}$ – закон Гука, переміщення циліндричної пружини.

Складові цих сил: $\vec{e}$ – напрям руху динамічної системи; *m, a* – рухома маса та прискорення технічної системи; *k* – коефіцієнт тертя Стокса; *C* – постійна жорсткості пружини – навантаження, яке викликає її деформацію, що дорівнює 1 мм.

Розв'язок задачі коливного процесу відповідно до наведеної динамічної моделі дозволяє оптимізувати співвідношення параметрів складових елементів цієї моделі *m, k, C.*

4.6.5. Технічна реалізація захисту від механічних впливів

4.6.5.1. Суть питання

Розробка заходів по ефективному захисту приладів і довкілля від механічних навантажень вимагає проведення теоретичних і експериментальних досліджень джерел цих навантажень, а також шляхів передачі коливань і ударів.

При цьому використовують такі теоретичні методи досліджень: моделювання систем, які підлягають коливанням та ударам; складання диференціальних рівнянь коливань та їх розв'язок для встановлених часових та частотних діапазонів; визначення резонансних точок і амплітуд. До експериментальних методів відносяться: вимірювання коливань та ударів на натуральних об'єктах та моделях; випробування демпферів, гасників коливань та ізоляторів.

Вибір методу залежить від змісту проблеми розгляду, а також від наявних технічних засобів та кваліфікації дослідників.

Розрізняють такі заходи щодо зниження коливальних і ударних навантажень:

– первинні: зменшення впливу збуджуючих величин шляхом демпфування, активної ізоляції або гасіння коливань в місці їх виникнення; таке гасіння можна здійснити з допомогою розбаланса або ж, навпаки, врівноваженням коливної системи;
– вторинні: зміни передавальної функції коливної системи за допомогою запобігання її резонансу й використання пасивної ізоляції.

Принципово, конструктор може знизити механічні коливальні й ударні навантаження як на прилад, так і на навколишнє середовище трьома шляхами: демпфуванням (зміною параметрів демпфування *ж, Q* або *D*), ізоляцією (зміною жорсткості *C*) коливної системи, гасінням цих навантажень шляхом зміни маси *m* коливної системи.

4.6.5.2. Демпфування (гасіння) коливальних та ударних навантажень

Здійснюється переважно з використанням гідравлічних демпферів у вигляді комбінацій «*поршень – рідина – циліндр*». Визначальні для демпфування є розмір шпарини поміж поршнем і циліндром, ступінь гладкості поверхонь контакту та їх відповідність, а також властивості рідини як робочого матеріалу. У конструкції демпфера розвивається так зване тертя Стокса (ф-ла 4.6.1).

Кількісною мірою демпфування є *коефіцієнт демпфування D*:

$$D = к/f_0 = к/\sqrt{C/m} = k/2\sqrt{Cm}. \qquad (4.6.2)$$

Тут: f_0 – власна частота коливання, $f_0 = \sqrt{C/m}$; k – постійна демпфування, *с*$^{-1}$, C – жорсткість пружини, *н/м;* m – маса об'єкта, *кг;* k – коефіцієнт тертя за Стоксом, *Н·с/м*; механічна постійна часу $\tau_m = 1/к = 2m/k$.

Формула (4.6.2) особлива тим, що вона об'єднує параметри динамічної моделі; це дозволяє провести кількісні оцінки коефіцієнта демпфування.

Добротність механічної системи Q пов'язана з коефіцієнтом демпфування *D так:*

$$Q = 1/2D = f_0/2к \qquad (4.6.3)$$

Теоретичний аналіз питання показав, що системи з оптимальним демпфуванням вважаються такими, в яких механічна добротність демпфування

$$Q = 1/\sqrt{2}. \qquad (4.6.4)$$

Зниження коливних та ударних навантажень здійснюється також з допомогою механічних дроселів, сільфонів, а також пневматичних або електричних демпферів.

Згідно з наведеними літературними даними, власні частоти f_0 і добротність Q деяких конструктивних елементів і вузлів приладів (апаратів) знаходяться у межах {10 ÷ 500} Гц, а добротність – {0,5 ÷ 200}. Знання цих параметрів важливе для розрахунків, вимірювань і перевірки параметрів коливань.

4.6.5.3. Принципи гасіння коливань

У верстато- і великому приладобудуванні (особливо в галузі виробництва металообробних верстатів) широко використовуються гасники коливань, за допомогою яких коливання основної маси може бути знижене при певній частоті. Це зниження відбувається внаслідок поглинання невеликою спеціально доданою масою або додатковою коливною системою, завдяки чому коливання основної системи гаситься. Гасники розраховують на визначену частоту збудження. Як показує досвід, за допомогою гасника коливання основної маси можуть бути знижені на 75%. У залежності від способу кріплення маси гасника до основної маси розрізняють пружинний, амортизаційний та пружинно-амортизаційний зв'язок між ними (рис. 4.6.5).

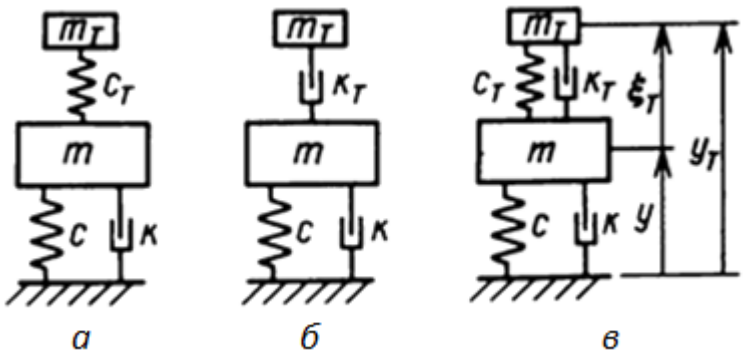


Рис. 4.6.4. Види зв'язку маси гасника з основною масою:
а – пружинний; *б* – амортизаторний; *в* – пружинно-амортизаторний

4.6.5.4. Конструктивні рішення ізоляції коливань та ударів; віброгасники та амортизатори

Під ізоляцією коливань розуміють зменшення або запобігання поширення коливань за допомогою ізоляторів (пружних елементів). Прилад або верстат має бути встановлений або підвішений на ізолятор.

Для ефективної ізоляції частота збудження $f_{зб}$ має значно відрізнятися від власної частоти f_0 ізолятора, оскільки в інших випадках можуть розвиватися так звані частоти пробою. При цьому ізоляція коливань буде ефективною, якщо власні частоти ізольованої системи будуть менше найнижчої гармоніки частоти збудження; по можливості необхідно дотримуватися співвідношення $f_0 < 0{,}5f_{зб}$. Рекомендується уникати попадання частоти руху в діапазон від 0,5 f_o до 2 f_o.

Перший рівень конструкцій – це гумові прокладки, які установлюються між виробом, який підлягає захисту, та монтажною базою; отримали назву віброізоляторів (рис. 4.6.5). Як віброізолятори використовують: сталеві пружини в опорах приладів або машин з низькими частотами обертання; гумові подушки, так звані еластоелементи, в опорах приладів і машин з частотами обертання від середніх до високих. Пружні і демпферні проміжні елементи, які встановлюють як прокладки поміж системою та її базовим елементом. Знаходять застосування пластини з гуми, пробкового дерева, повстяні (рос. войлок), пластмаси та металопластмаси, інший багатошаровий листовий матеріал, пісок тощо.

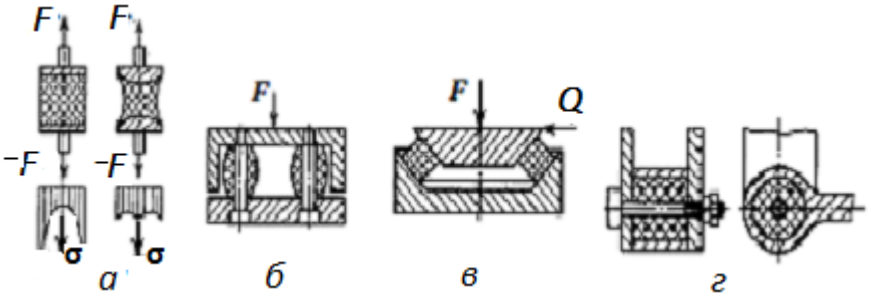


Рис. 4.6.5. Конструкції гумових віброізоляторів:
а − варіанти циліндричних, що працюють на розтяг (внизу – поперечний розподіл напружень розтягу у гумі);
б − порожнинний, працює на стиск;
в − кільцевий, працює на стиск, зсув, кручення;
г − з гвинтовою циліндричною пружиною: сприятливий до динамічних та ударних навантажень

Для виконання своїх функцій впродовж тривалого терміну служби, їх конструкція має відповідати певним вимогам. Круглі гумові віброізолятори (рис. 4.6.5, *а*), що працюють на розтяг, завдяки циліндричної форми при відповідній деформації можуть витримують високі механічні напруження. З двох наведених конструкцій варіант справа більш оптимальний щодо поперечного розподілу напруження, як це показано на епюрах внизу конструкцій. Якщо порожнистий віброізолятор з циліндричної гуми (рис. 4.6.5, *б*) навантажується на стиск в напрямку осі циліндра, то тіло гуми значно розширюється в поперечному напрямку. Ця деформація має бути вільною, деталі не повинні дотикатись до стінок або взаємно, що ураховується при конструюванні ізолятора. Кільцевій гумовий віброізолятор (рис. 4.6.5, *в*) призначений для передачі сил стиснення, зсуву, а також крутного моменту при одночасному демпфуванні коливань. Для передачі крутного моменту еластичний елемент такого віброізолятора має бути зчеплений вулканізацією (спіканням) з ведучим і веденим дисками з урахуванням дотичних реактивних напружень, що розвиваються при навантаженнях. При одночасній дії ударних і стискаючих навантажень в гуму амортизатора може бути встановлена спіральна циліндрична пружина для підвищення межі міцності на стиск (рис. 4.6.5, *г*).

Але гума як пружний матеріал має низку недоліків. Вона недостатньо витримує великі та тривалі навантаження; її еластичність значно зменшується при низьких температурах: при $\theta = -30\,^{\circ}\mathrm{C}$ жорсткість зростає приблизно у 1,5 раз, а при $\theta = -60\,^{\circ}\mathrm{C}$ гума взагалі непридатна до використання; при підвищених температурах, $\theta = +80\,^{\circ}\mathrm{C}$, а також під дією сонячної радіації гума «старіє», утворюються поверхневі тріщини.

Другий рівень конструкцій – це гумометалеві амортизатори (рис.4.6.6).

Промисловість випускає такі типи амортизаторів: АП – амортизатор пластинчастий (рис. 4.6.6, *а*), АН – амортизатор «ніжка» (рис. 4.6.6, *б*) , АЧ – амортизатор чашковий, АД – амортизатор демпферний (рис. 4.6.6, *в*).

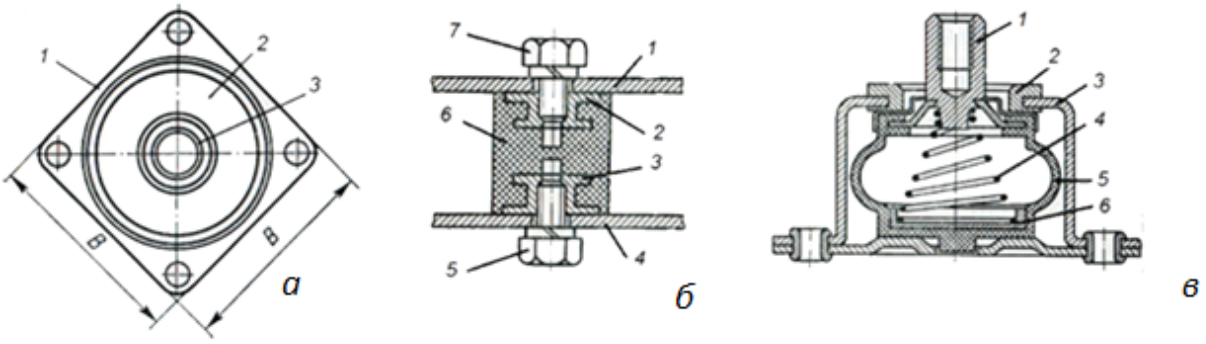


Рис. 4.6.6. Стандартні гумометалеві амортизатори:

а – амортизатор пластинчатий АП: 1 – пластина кріпильна, 2 – гумовий елемент, 3 – втулка;

б – амортизатор «ніжка» АН: 1, 4 – кріпильні бази, 2, 3 – втулки; 6 – гумовий елемент; 5, 7 – кріпильні болти;

в – амортизатор демпферний АД: 1 – робоча втулка, 2 – фланець гумовий, 3 – корпус амортизатора, 4 – пружина, 5 – балон гумовий, 6 – пластина опорна

Пружинно-комбінованим амортизаторам (рис. 4.6.6 *в*) властиві високі функціональні та експлуатаційні властивості. Пружним елементом тут виступає циліндрична, конічна або експонентна (для рівночастотних амортизаторів) спіральна пружина. Гумовий елемент – це фланець, який «розв'язує» корпус з виробом, що підлягає вібраційному захисту. Демпфуюча оболонка 4 має калібрований отвір невеликого розміру (на рисунку не показано), який сполучає внутрішній об'єм з оточенням, призначений для перепуску повітря і «заспокоює» коливання при ударних навантаженнях.

Існує велика множина конструктивних рішень віброізоляторів та амортизаторів, призначених для захисту механічно залежних технічних систем.

Їх ефективність оцінюється за відомою філософською тезою

«Практика – критерій істини»

4.7. Захист від звуку та шуму

[1, 3]

Шуми, що випромінюються технічними системами, можуть складати небезпеку не тільки здоров'ю обслуговуючому персоналу, але і природному

оточенню. Отже, ці питання взаємозв'язані; до основних параметрів на виріб, поряд з його функціональними параметрами необхідно відносити й характеристики шуму, що випромінюються ним. Це знаходить відображення у сучасних тенденціях щодо безпеки експлуатації приладу, які закладені у відповідних стандартах.

4.7.1.Фізичні характеристики звуку та їх визначення

Вухо людини (і не тільки людини) реагує на таку фізичну характеристику звуку, як *звуковий тиск p*, що являє собою інформаційне збурення звукового поля, накладеного на постійний атмосферний тиск.

Чутність вуха людини до звукового тиску: від $2 \cdot 10^{-5}$ Па (*поріг чутності*) і приблизно до 20 Па (*поріг больового відчуття*).

У зв'язку з великим перепадом звукового тиску діапазону чутності для його описання була вибрана логарифмічна рівнева шкала. При цьому в якості начала відліку чутності *рівень звукового тиску L* визначається відносно звукового тиску порогу чутності p_0 так:

$$L = 10\,lg(\,p^2/p_0^2) = 20\,lg(\,p/p_0), \text{дБ}. \qquad (4.7.1)$$

Звуковий тиск як сила, що діє на одиничну площадку (перпендикулярну до напряму поширення), залежить від відстані цієї площадки до джерела звуку і тому не може використовуватись для однозначного опису звукових властивостей джерела. Для цього використовується поняття звукової потужності *P*, яка представляє собою загальну кількість звукової енергії, що випромінюється джерелом за одиницю часу. Вона не залежить від умов вимірювання, є об'єктивною великою, придатною для оцінки джерела звуку. Але, на відміну від звукового тиску, звукова потужність є побічною величиною і не може бути виміряна безпосередньо; її розраховують за результатами вимірювань. У метрології звуку звукова потужність, як і звуковий тиск, визначуваний за формулою (4.7.1), також представлена за логарифмічною шкалою у вигляді рівня:

$$L_P = 10\,lg(\,P/P_0), \text{дБ}. \qquad (4.7.2)$$

Тут за начало відліку взято звукову потужність $P_0 = 10^{-12}$ Вт – інтегральну потужність на внутрішній поверхні сфери площею 1 м^2, в центрі якої розташовано джерело звуку, яке створює звуковий тиск $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па , тобто поріг чутності.

Розглянемо порядок розрахунку сумарного рівня звукового тиску при одночасній роботі декількох джерел звуку – розрахунок загального шуму приладу при наявності деякої сукупності шумових вузлів (накладання декількох некогерентних джерел звуку). Отже, загальний рівень звукового тиску визначається сумуванням окремих рівнів, дБ:

$$L_\Sigma = 10\,lg(\textstyle\sum p_\nu^2/p_0^2) = 10\,lg\sum_{\nu=1}^{n} 10^{0,1L_\nu}. \qquad (4.7.3)$$

Для двох джерел, що випромінюють звук на рівнях L_1 і L_2, визначених за рівнянням (4.7.2), сумарне значення рівня звукового тиску знаходять за спрощеною формулою

$$L_{\Sigma} = 10\,lg\,1\,0^{0,1L_1}\left(1 + 10^{-0,1(L_1 - L_2)}\right) = L_1. + \Delta L \qquad (4.7.4)$$

Для визначення ΔL використовується така номограма:



Поняття *еквівалентного рівня звуку L* використовується для приладів, що працюють у перервному режимі або тих, рівень звуку яких сильно змінюється в залежності від умов роботи. У першому наближенні еквівалентний рівень звуку визначається як усереднене значення рівня звуку, що випромінюється приладом за час усереднення. Для заходів щодо зменшення шуму приладом цей параметр відіграє другорядне значення. Для точного вимірювання рівня звукового тиску (і, отже, визначення рівня звукової потужності) необхідний облік умов оточуючого середовища, особливостей місця вимірювання і робочого стану вимірюваного об'єкта, а також облік характеристик і умов застосування вимірювального приладу. Ці зауваження викладені у діючих стандартах щодо питань, які також містять вказівки з розрахунків рівня звукової потужності за значеннями звукового тиску.

Для вироблення заходів щодо захисту від шуму та оцінки їх ефективності важливе знання не точних абсолютних, а лише відносних значень параметрів шуму. У таких випадках дотримання вимог стандартів небов'язкове, однак при цьому важливо проводити вимірювання шуму в однакових умовах.

Прилади для замірів звукового тиску носять назву шумомірів, функціональна схема яких подана на рис. 4.7.1.

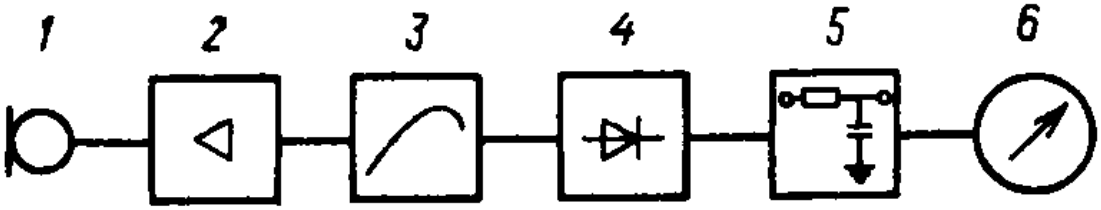


Рис. 4.7.1. Функціональна схема шумоміра:

1 – датчик (мікрофон); 2 – підсилювач; 3 – фільтр;
4 – блок формування середньо арифметичного значення;
5 – схема часового оцінювання; 6 – індикатор показань

Напруга, яка генерується вимірювальним мікрофоном, пропорційна звуковому тиску, посилюється, випрямляється і виводиться на індикатор. У цих

приладах використовують фільтри, смуга пропускання яких дозволяє виділяти спектр звукових частот, чутних людиною.

При цьому стандартизовані чотири форми характеристик шумомірів (*A*, *B, C* і *D)*, визначені встановленим у прилад фільтром (рис. 4.7.2).

Характеристика *A* найбільшою мірою відповідає чутності вуха людини при середніх рівнях звуку; вона найбільш широко використовується для розробки заходів боротьби з шумом. Інші характеристики призначені для оцінки спеціальних видів шуми (наприклад, шуми літальних апаратів) та застосовуються зрідка, відповідно до призначення.

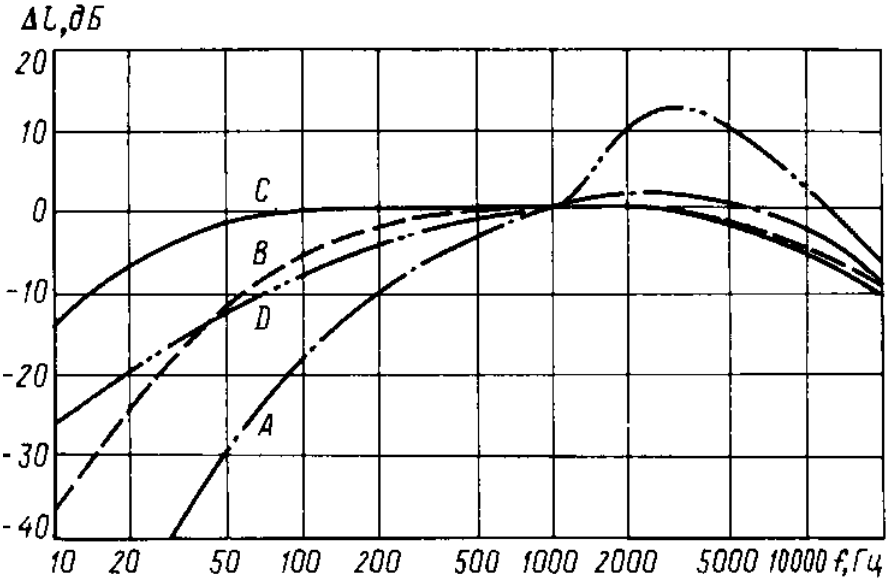


Рис.4.7.2. Стандартні характеристики шумомірів

Крім частоти, шумомір дозволяє оцінити і тимчасовий розподіл звукового тиску. Для цього в приладі передбачено три режими роботи: S (повільний), F (швидкий) і I (імпульсний), що дозволяє узгодити динамічні характеристики індикатора зі спектром шум. У більшості випадків використовується режими S (близький до рівномірного шуму, час інтегрування 1000 с) та I (імпульсний шум, час інтегрування 35 мс); вибір відповідного режиму визначається стандартами вимірювань.

У сучасному виконанні датчик звуку інтегрований з цифровим процесором, що дозволяє проводити довільну обробку результатів вимірювань відповідно до наперед поставленої задачі.

4.7.2. Природа виникнення шуму в технічних системах

В залежності від джерела розрізняють безпосередній і побічно викликаний шум. У першому випадку повітря як середовище передачі звук отримує коливальні рухи шуму безпосередньо. Цей рух може бути викликаний періодичним або стохастичним коливанням потоку повітря в результаті утворення вихорів на

обертових деталях, наприклад, на лопатях вентилятора або при проходженні отворів. Цей вид звуку отримав назву *повітряного* шуму.

Побічно викликаний шум – так названий *структурний* шум. Причиною його виникнення – це *стохастична* (вібраційна) збуджуюча механічна сила, що описується спектром частот $\tilde{F}(\omega)$.

На рис. 4.7.3 демонструється загальна схема формування шуму у конструкції з трьох елементів. Передача структурного звуку залежить від акустичної провідності деталей, а повітряного шуму – від площі взаємодії, мікрогеометрії поверхонь та кліматичних факторів – звукової провідності середовища провідності.

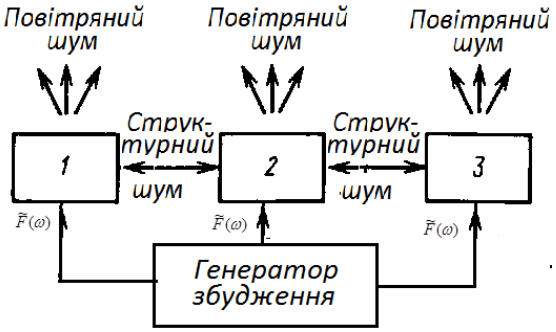


Рис. 4.7.3. Формування шуму в конструкції з трьох елементів

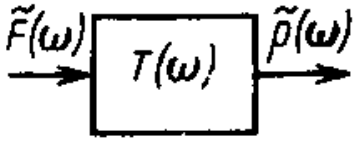


Рис. 4.7.4. Схема формування структурного (побічного) шуму

Для розробки заходів боротьби з шумом необхідно виявити всі можливі причини його виникнення, а також їх взаємозв'язок. Нижче розглянуті правила зниження шуму шляхом зміни величин впливу.

4.7.3. Зниження генерації звуку технічною системою

4.7.3.1. Загальні питання

Основною метою заходів, направлених на зниження шуму, є зменшення його впливу на людину. Розрізняють первинні та вторинні заходи захисту від шуму. Під первинними розуміють всіх заходи, які стосуються безпосередньо джерела шуму: від збуджуючої сили до умов формування випромінювання. Вторинні стосуються умов поширення шуму: це застосування шумопоглинаючих покриттів та екранів на шляху поширення шуму.

При проектуванні технічної системи головна увага конструктора має зосереджуватись на первинних заходах, тобто максимально знизити шум, що продукується технічною системою. Перший крок аналізу – необхідно побудувати схему джерел шуму, в яку занести первинні причини збудження за класифікацією, викладеною в 6.6.2. Отже, фактори первинного шуму такі:

1) збуджуюча сила, 2) структурні, 3) повітряні фактори.

Вибір заходів захисту від шуму доцільно розпочинати за побудованою схемою шумових потоків, на якій наносяться основні джерела шуму, шляхи передачі структурного та повітряного звуку, а також поверхні, які випромінюють звук.

До загальних рекомендацій щодо захисту віднесемо таке. По-перше, оскільки сумарний рівень звукового тиску кількох джерел шуму визначається сумою логарифмів їх звукових тисків, то насамперед необхідно знижувати шум тих джерел, рівень звукових тисків яких перевищує на 5 дБ рівень решту джерел. Далі. Якщо за допомогою схеми аналіз звукових потоків виявить лише одне структурне джерело, яке в подальшому перетвориться у повітряний шум на різних поверхнях, то необхідна ізоляція цього джерела в безпосередній близькості до від нього. Перейдемо до розгляду факторів первинного шуму.

4.7.3.2. Зменшення збуджуючої сили

На рис. 4.7.4 показана схема формування структурного (побічного) шуму, відповідно до якої закон утворення структурного шуму у вигляді звукового тиску $\tilde{p}(\omega)$ запишеться так:

$$\tilde{p}(\omega) = \tilde{F}(\omega)T(\omega). \qquad (4.7.4)$$

Тут $\tilde{F}(\omega)$ – збуджуюча сила, $T(\omega)$ – передаточна функція, яка представляє акустичні властивості технічної системи.

Як видно з рівняння (4.7.4), зменшення звукового тиску $\tilde{p}(\omega)$ можливе за рахунок зменшення сили $\tilde{F}(\omega)$ і передаточної функції $T(\omega)$.

Збуджуюча сила має вібраційний характер, описується спектром частот $\tilde{F}(\omega)$ і проявляється у вигляді:

1) реакцій опор; 2) електромагнітного шуму; 3) аеродинамічного шуму.

Збуджуюча сила реакцій опор. Сила виникає внаслідок вібрацій у шпаринах кінематичних пар, які забезпечують рухоме з'єднання дотичних ланок. Чим більші шпарини, тим активніший прояв вібрацій, тим більший структурний шум. Сили тертя в парах також призводять до вібраційних збуджень, особливо у межах динаміки конусу тертя, що особливо проявляється у зворотно-поступальних рухах. Важливе збільшення часу контакту елементів та зменшення площі випромінювання звуку, хоча зменшення площі призводить до збільшення тиску, що породжує проблему оптимізації.

Зниження шуму сил реакцій у вузлах досягається:

- підвищенням точності виготовлення деталей;
- підвищенням якості центрування та балансування обертових деталей;
- поліпшенням змащування;
- заміною зворотно – поступального переміщення обертовим;
- використовуванням зубчатих передач з спеціальним профілем або заміною їх на малошумні передачі (клинопасову, гідравлічну);

– використанням гнучких сполучень;
– заміною підшипників кочення на підшипники ковзання;
– використовуванням негучних матеріали (наприклад, пластмаси);
– використовуванням вібродемпфуючих матеріалів (мастика);
– збільшенням маси базового елемента, віброізоляція технічної системи від фундаменту*.

*Наприклад, для віброізоляції такого віброзалежного приладу як профілометр-профілограф рекомендується: встановлювати прилад не вище 2-го поверху; як стіл використати суцільно зварну раму з швелера мін. № 9; кришка стола тришарова: 1) металева плита $\delta \geq 15\ mm$, 2) свинцевий лист $\delta \geq 5\ mm$, 3) мармурова плита $\delta \geq 25\ mm$.

Електромагнітний шум* – це механічні коливання електротехнічних пристроїв або їх частин, які збуджуються змінними магнітними та електричними полями. До методів боротьби з цим шумом відносять: застосування феромагнітних матеріалів з малою магнітострикцією; зменшення щільності магнітних потоків у електричних машинах за рахунок належного вибору їх параметрів; добру затяжку пакетів пластин в осердях трансформаторів, дроселів, якорів двигунів тощо; застосування косих пазів для обмоток у статорах і роторах машин, які зменшують імпульси сил взаємодії обмоток та розтягують ці імпульси в часі.

**Примітка*. Магнітострикційні ефекти – зміна форми та об'єму феромагнетику при його намагнічуванні, що приводить до механічних вібрацій з подальшими звуковими ефектами в залежності від частоти поля збудження.

Аеродинамічний шум. Джерелами можуть бути нестаціонарні явища при течії газів та рідин. Засоби боротьби з аеродинамічним шумом у джерелі його виникнення досягаються:

- зменшенням швидкості руху газів;
- згладжуванням гідроударних явищ за рахунок збільшення часу відкриття затворів;
- зменшенням вихорів у струменях за рахунок вибору профілів тіл, що обтікаються;
- дробленням струменів за допомогою насадок;
- використанням ежекторів, що знижують випромінювання шуму на границі струмінь – довкілля.

Приклади звукових ізоляторів корпусного шуму показані на рис. 4.7.5.

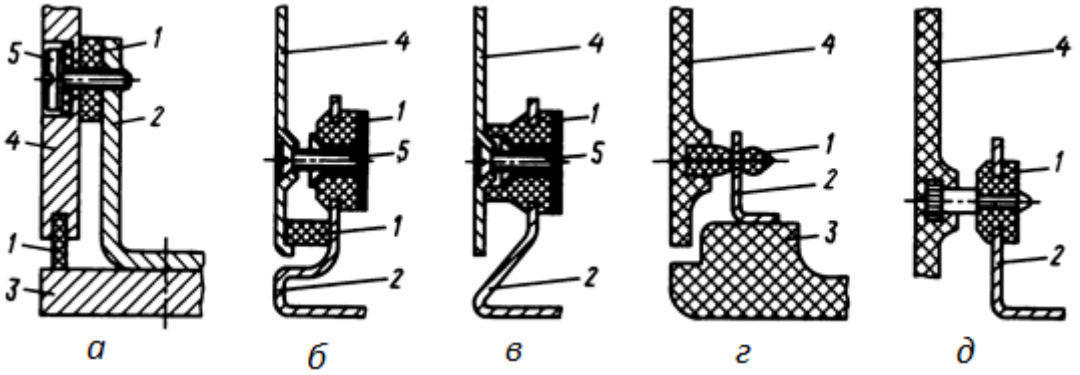


Рис. 4. 7. 5. Приклади звукоізоляторів в зоні кріплення бокових стінок корпуса до основи: *а* – масивна стінка, станина з листового матеріалу великої товщини; *б, в* – тонколистова стінка; *г, д* – пластмасовий або металевий відлитий корпус; 1 – прокладка або формова деталь з пружного матеріалу; 2 – кріпильний кутник; 3 – станина; 4 – стінка корпуса; 5 – кріпильний гвинт

Способи зниження шуму, що викликаються потоком робочого середовища, подані в табл. 4.7.1.

Таблиця 4.7.1

Способи зниження шуму, утвореного потоком робочого середовища

Способи зниження шуму	**Невірно**	**Вірно**
Зменшення вихроутворення на деталях, які виступають в канал, по якому тече потік робочого середовища		
Усунення стрибкоподібної зміни поперечного перетину каналу і гострих крайок в ньому		
Надання аеродинамічне обтічної форми деталям, що занурені в потік, з метою мінімізації їх аеродинамічного опору		
Максимальне зниження швидкості потоку робочої рідини при тій же пропускній спроможності внаслідок збільшення прохідного діаметру та зменшення швидкості обертання вентилятора		
Виконання отвору для засмоктування робочого середовища у вигляді дифузора		
Витримка симетрії розташування вентилятора відносно отвору та мінімізація шпарини поміж крильчаткою та стінками		
Встановлення захисної решітки якомога подалі від крильчатки та надання конструктивним елементам захисту аеродинамічне вигідної форми		

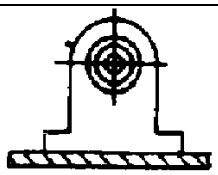
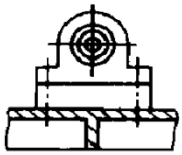
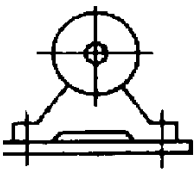
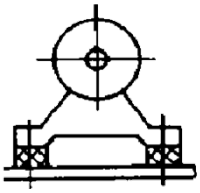
4.7.3.3. Ізоляція структурного звуку

Як випливає з § 4.7.2, на функцію передачі структурного звуку впливає акустична провідність деталі, яка підлягає дії збуджуючої сили. Ця провідність є не чим іншим як швидкістю поширення звуку, визначається механічною пружністю і жорсткістю деталі на згин в зоні збудження сили. Жорсткість залежить від пружності матеріалу деталі з одного боку, а з іншого – від її маси та геометрії (наявність ребр жорсткості). Чим більша жорсткість, тим менша провідність. Провідність зростає при спряженні конструктивних елементів, які мають істотні відмінності в масі; невеликі коливання деталі великої маси викликають значні коливання деталі малої маси. Це яскраво проявляється у так названому корпусному шумі – вібрації тонкого захисного кожуха компресора під дією сил збудження. Для зниження корпусного шуму використовують шумо- та віброізолюючі прокладки (пружна гума, свинець). Окрім того, можна збільшити масу більш легкої деталі установкою бандажа вздовж лінії спряження, але найсприятливіший конструкторський розв'язок – комбінація прокладок з нанесенням в зоні передачі структурного звуку шумоізолюючої мастики з тканинним бандажем.

Дуже вагома обставина: резонансна частота всієї технічної системи має бути нижчою за резонансну частоту сили збудження. Приклади ізоляції структурного звуку наведені в табл. 4.7.2.

Таблиця 4.7.2

Способи зниження структурного звуку

Конструктивні заходи	**Неправильно**	**Правильно**
Зменшення акустичної проникності здійснено установкою додаткової маси та використання ребра жорсткості		
Потужні джерела структурного звуку (двигуни, редуктори) необхідно встановлювати на пружні прокладки		

4.7.3.4. Ізоляція повітряного звуку

Звукова потужність *P,* яку випромінює конструктивний елемент, залежить від коефіцієнта випромінювання σ, площі *A* поверхні елемента і середньої частоти коливання ν цієї поверхні:

$$P \approx \sigma A \bar{v}^2. \qquad (4.7.5)$$

Коефіцієнт випромінювання характеризує ступінь перетворення структурного звуку у повітряний. Яскравий приклад того – це звучання динаміка. Тут структурним звуком виступає коливний рух котушки у магнітному полі, а

повітряним – рух дифузора. Цей процес розглядається як випромінювання деякої рухомої поверхні (дифузора) під дією зовнішніх коливних дій (втягування котушки у магнітне поле).

Слід врахувати, що випромінювання повітряного звуку конструктивним елементом буде тільки тоді інтенсивним, коли довжина хвилі згинальних коливань елемента буде більшою довжини хвилі повітряного звуку. У динаміку такий стан забезпечується конструктивно пружною розв'язкою у вигляді гофри між циліндричною частиною дифузора, де розташована котушка, і власне дифузором, унаслідок чого його рух дещо відстає від переміщення котушки. У іншому випадку між сусідніми частинками повітря, що знаходяться у стані коливання, може встановитися рівновага – такий стан називають гідродинамічним коротким замиканням. Цей ефект використовується для гасіння звуку, що генерується всередині приладу, внаслідок залежності швидкості поширення згинаючих хвиль від частоти, тоді як швидкість поширення повітряного звуку постійна, гідродинамічне коротке замикання настає на частотах нижче граничної частоти. Гранична частота f_{gB} залежить від властивостей конструктивного елемента; для тонкостінного (з товщиною стінки $\delta = 1 \dots 3\, mm$) f_{gB} становить приблизно 5-10 кГц, завдяки чому домінуючі в приладах частоти, що лежить в діапазоні 0,5-5 кГц, випромінюються з меншою інтенсивністю. У разі деталей великої товщини і з великими поверхнями гідродинамічне замикання можна отримати штучно за допомогою отворів, що дозволяє забезпечити рівність тисків. Площа отворів повинна складати менше 20% загальної площі. Однак найчастіше такий захід веде до втрати ефекту гасіння повітряного звуку, що інколи спостерігається при перфорації корпусів, кришок, захисних кожухів приладів. Найкращий ефект звукоізоляції досягається повною герметизацією з обробкою внутрішніх стінок корпусів шумо-поглинаючими покриттями, приділяючи особливу увагу герметизації технологічних отворів. Для цього найкраще зарекомендувала себе пориста гума.

4.7.3.5. Звукоізоляція типових конструктивних елементів приладів

Розглянемо причини шуму і способи його ізоляції для типових елементів технічних систем.

Зубчаті передачі. Причини шуму:

- шум (широкосмуговий), викликаний тертям внаслідок шорсткості бокових поверхонь зубців;
- коливні навантаження, викликані ударами зубців при вході їх у зачеплення (характеристики шуму сильно залежать від частоти навантаження, змащування, співвісся спарених коліс, матеріалу коліс).

Способи боротьби з шумом:

1) зниження частоти обертання та забезпечення рівномірного розподілу передаточного відношення між ступенями передачі;
2) мінімізація відхилень від номінальних геометричних параметрів коліс та похибок при складанні; застосування високов'язких матеріалів; зменшення шорсткості бокових поверхонь зубів, наприклад, шліфуванням, поліруванням або обкочувального притирання; застосування матеріалу, що відрізняється високим внутрішнім демпфуванням (текстоліт, поліамід); округленням головок зубців (при модулях m < 1 мм); перехід до косозубих зачеплень; заміна металевих зубчатих передач передачами зубчастим пасом.

Шатунні передачі. Причини шуму: збудження коливань як результат нерівності руху елементів передачі; удари внаслідок шпарин в спряженнях.

Способи боротьби з шумом:

1) зниження максимального прискорення в процесі руху елементів передачі; мінімізація вільних сил і моментів через оптимальний розподіл мас;
2) виключення або мінімізація шпарин у спряженнях (за допомогою звуження полів допусків), використання пружних матеріалів та матеріалів з високим внутрішнім демпфуванням для важелів і шарнірів.

Кулачкові механізми. Причини шуму: збудження низькочастотних коливань періодичним обкочуванням кулачка; удари при відриві штовхача від кулачка.

Способи боротьби з шумом:

1) використання законів руху, неперервних до третьої похідної;
2) забезпечення достатньої жорсткості штовхача при мінімальній масі;
3) низька хвилястість робочих поверхонь кулачка.

Підшипники кочення. Причини шуму: коливання елементів підшипника як результат технологічних похибок, похибки збирання, забруднення та зносу. При цьому в основному збуджується структурний звук, рівень шуму зростає зі збільшенням частоти обертання і діаметра підшипника.

Способи боротьби з шумом:

1) застосування малошумних підшипників; правильний вибір посадки для мінімізації люфтів у підшипнику;
2) запобігання забрудненню; використання високов'язких мастильних матеріалів;
3) монтаж пружних елементів між підшипником та несучою конструкцією;
4) заміна підшипниками ковзання з урахуванням функціональних вимог.

Мікродвигуни та вентилятори. Причини шуму: вплив магнітні полів (коливання в пакеті сердечника, зумовлені явищем магнітострикції, і в повітряних шпаринах); збудження механічних коливань в результаті

розбалансу, люфти в підшипниках і удари щіток про колектору; аеродинамічні коливання в пазах, на лопатях вентилятора та інше.

Способи боротьби з шумом:

1) кріплення двигуна на пружній основі; застосування пружних ведених ланок (пасові передачі);
2) вибір малошумних двигунів (безколекторних);
3) ретельне балансування; зниження вихроутворення шляхом вибору аеродинамічне досконалих форм.

Елементи, робота яких супроводжується ударами (наприклад, упори, стопори, муфти зчеплення). Причини шумів: удари, необхідні для виконання функцій приладу; наприклад, удари магнітних пристроїв, фіксаторів, муфт зчеплень, щупів, упорів та ін.

Способи боротьби з шумом:

1) зменшення маси і швидкості співударних тіл;
2) застосування пружних матеріалів з вищим внутрішнім демпфуванням (з врахуванням можливого зносу);
3) запобігання відскокам і резонансу; підвищення жорсткості конструкції;
4) заміна механічного принципу дії немеханічним, напр., електричним.

Конструктивні елементи великої площі (наприклад, корпус, кришки, плоскі важелі, кожухи). Причини шуми: випромінювання повітряного звуку внаслідок збудження корпусного звуку в залежності від власних частот та способів кріплення елементів.

Способи боротьби з шумом:

1) вибір власної частоти поза межами звукових частот;
2) вирівнювання тиску на окремих сторонах розмежування «прилад – оточення» за допомогою отворів (площа отворів має складати не менше 20% загальної площі);
3) використання корпусних матеріалів з високим демпфуванням, наприклад багатошарових плит;
4) підвищення демпфування за допомогою відповідного кріплення деталі (зокрема зварювання можна замінити різьбовим з'єднанням).

5. Теорія точності приладів і апаратів

5.1. Анотація

Не дивлячись на наявність спеціальної літератури з питань точності роботи приладів [39 – 45], а також їх суміжний багаточисельний виклад [1, 3, 6, 11, 20, 23, 25, 28, 29, 34, 36, 45, 48,], сьогодні практично відсутній аналіз науково-технічної літератури з теми та цілісна картина. Розрізнені матеріали окремих авторів не формують цієї картини, що ускладнює термінологічну, методологічну та методичну основу сприйняття матеріалу. Вважаємо, що нижчевикладене, відповідно до [46], ляже в основу науково-методичної бази теми точності роботи не лише приладів, а й технічних систем взагалі. Матеріал буде корисним у навчанні студентів профільних спеціальностей так і спеціалістам у наукових дослідженнях галузі «Приладознавство».

5.2. Вступне слово

Прилад називають точним, якщо задається допуск на виконання дій цим приладом. Поняття «точність» – це критеріальна характеристика приладу, під якою розуміють відносне числове відхилення від номінальних результатів виконання дій відповідно до функціональної ідеї, зокрема здійснювати вимірювання фізичних величин в одиницях еталона мір цієї величини. Інакше, характеристикою точності є похибка положення виконавчого (вихідного) елемента приладу як різниця між дійсним та істинним (номінальним) значеннями його вихідної координати при заданому положенні вхідного елемента цього ж приладу.

Допуск – це межі, у яких спостерігається відхилення дійсного (зчитаного приладом, реального) значення функції перетворення сигналу $Y_{\partial i\ddot{u}c.}$ від істинного $Y_{icm.}$. Переважно у технічній літературі поняття допуску замінюється поняттям абсолютна похибка:

$$\Delta Y_{\partial on} = \pm\left[Y_{\partial i\ddot{u}c.} - Y_{icm.}\right]. \tag{5.1}$$

Точність – це ступінь наближення $Y_{\partial i\ddot{u}c.}$ до $Y_{icm.}$. Чим менше відрізняються ці величини, тим вища точність. У формулярі на прилад під поняттям «точність» розуміють відносну похибку.

$$\Delta = \pm\left[\frac{Y_{\partial i\ddot{u}c.} - Y_{icm.}}{Y_{icm.}}\right]. \tag{5.2}$$

Отже, поняття допуску і точності взаємодоповнюючі. У технічних умовах на прилад може указуватись як допуск на точність виконання дій цим приладом, так і точність його роботи. Точність оцінюється за класами, числові параметри яких визначаються у відсотках.

За ДСТУ встановлені такі класи точності:

0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; 4,0; 6,0.

Принципи поділу приладів за призначенням відповідно до класів точності:

1) прилади метрологічні та наукові – не гірше 0,5 класу;
2) прилади для технічних вимірювань – {1 - 4}класи;
3) індикаторні прилади – 6-й клас точності.

Виготовлений прилад перед відправкою до споживача підлягає *атестації*, тобто здійснюються процедури встановлення відповідності наявних метрологічних параметрів виготовленого приладу з параметрами, які указані в технічних умовах на цей прилад. Для проведення атестації необхідне використання мір фізичних величин, які служать еталонами вимірювальних величин. Процедура атестації проводиться при так званих нормальних зовнішніх умовах:

температура оточення $t = 20 \pm 0{,}5^0C$; *атмосферний тиск* $p = 760$ *tor.*

Загальний аналіз результатів атестації приладів усіх існуючих принципів перетворення сигналу і конструкцій дав можливість провести класифікацію приладів за характером залежності відносної точності їх роботи від абсолютних значень вимірювальних величин. Встановлено три групи кінцевих похибок, графічний характер яких демонструється рис. 5.1 [6].

Характерним для усіх груп є те, що загальний характер ходу включає дві складові: системну та випадкову. Системна складова похибки фактично проявляє середнє значення, тоді як випадкова здійснює осциляцію вздовж середнього значення. Проведемо аналіз графічного ходу кінцевих похибок.

Перша група (рис. 5.1, *а*). Середнє значення відносної похибки Δy_0 зміщене або незміщене відносно нуля і не залежить від абсолютного значення вимірювальної величини x; випадкова складова володіє осциляційним характером вздовж середнього значення.

Друга група (рис. 5.1, *б*). Середнє значення відносної похибки Δy_0 зростає лінійно; випадкова складова, як і в першому випадку, володіє осциляційним характером уздовж відносної похибки.

Третя група (рис. 5.1, *в*). Середнє значення відносної похибки Δy_0 змінюється нелінійним чином; випадкова складова володіє осциляційним характером.

Ці результати відкривають можливість удосконалення конкретного екземпляра приладу шляхом виявлення недосконалих ланок з наступним встановленням відповідних компенсаторів. Очевидно, що найпростішим випадком для встановлення компенсаторів є перша група приладів. Дещо складніша, яку водночас практично можна вдосконалити, друга група. Третя група, очевидно, прогнозованій компенсації не підлягає.

Отже, базуючись на залежностях рис. 5.1 робимо висновок, що причини неточності роботи приладів мають різну природу.

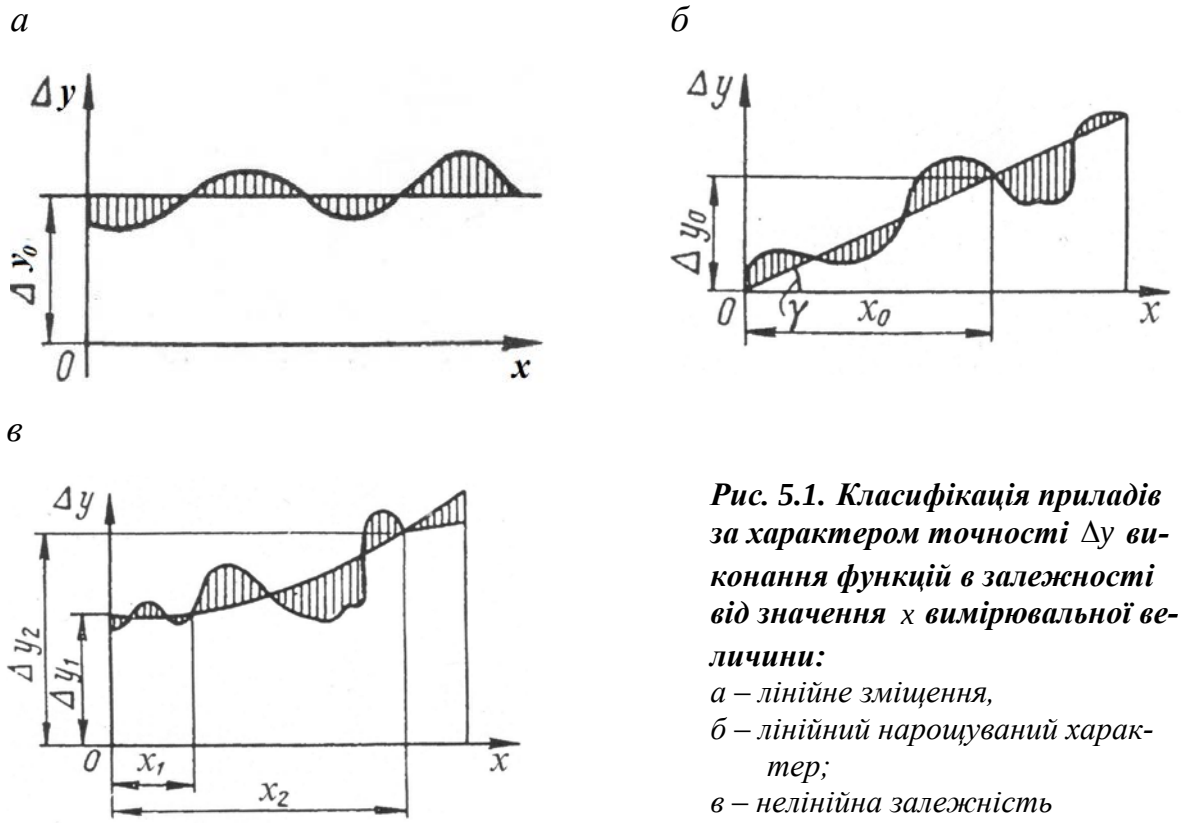


Рис. 5.1. Класифікація приладів за характером точності Δy ***виконання функцій в залежності від значення*** x ***вимірювальної величини:***

а – лінійне зміщення,
б – лінійний нарощуваний характер;
в – нелінійна залежність

Для аналізу цих причин з метою їх мінімізації або ж ліквідації розроблена теорія точності роботи приладів, яка розв'язує декілька задач.

Перша. Виявлення фізичної природи похибок виконання дій приладом.

Друга. Встановлення вагових коефіцієнтів кожної із причин неточності.

Третя. Розробка комплексу заходів та прийняття рішень з метою мінімізації впливів на стадіях проєктування, конструювання та виготовлення.

Четверта. Розробка методів дослідження та прогнозу характеристик точності роботи приладів.

Розрізняють *пряму* та *обернену* задачі теорії точності роботи приладів.

Пряма. При заданих допусках на параметри, розміри і характеристики елементної бази приладу визначити точність його роботи.

Обернена. При заданому допуску на виконання функцій приладом визначити допуски на параметри його складових елементів.

5.3. Основне рівняння лінійної теорії точності; структура похибок

Началом розробки теорії точності роботи приладів вважається 1942 рік. На основі практичних спостережень основним результатом теорії є формулювання так званої лінійної теорії точності [41], а в подальшому і нелінійної [42].

Відповідно до [6], основним рівнянням теорії є рівняння типу

$$\Delta y_{\Sigma} = \Delta y_{\Delta f} + \Delta y_{\Delta q} + \Delta y_{\Delta x} \, . \qquad (5.3)$$

Або ж таке [46] :

$$\Delta y_{\Sigma} = \Delta y_{\Delta f} + \Delta y_{\Delta q} + \Delta y_{\Delta t} \ . \qquad (5.4)$$

Бачимо, що у цитованій літературі не має однозначності у формулюваннях, в зв'язку з чим пропонуємо об'єднати формули (3) і (4) так:

$$\Delta y_{\Sigma} = \Delta y_{\Delta f} + \Delta y_{\Delta q} + \Delta y_{\Delta t} + \Delta y_{\Delta x} \ . \qquad (5.5)$$

Отже, в нашому представленні формула (5.5) – це основне рівняння лінійної теорії точності [45], яке і покладено в основу для подальшого розгляду.

Зміст складових рівняння (5.5) такий:

Δy_{Σ} – кінцева похибка виконання основної функції приладом.

Права частина рівняння відображає структуру (фізичний зміст) похибок роботи приладів і апаратів (систем), а саме:

$\Delta y_{\Delta f}$ – теоретична похибка, тип "A";

$\Delta y_{\Delta q}$ – технологічні (первинні) похибки, тип "B";

$\Delta y_{\Delta t}$ – експлуатаційні похибки, тип "C";

$\Delta y_{\Delta x}$ – похибка зчитування сигналів, тип "D".

Цей підхід називають лінійною теорією точності, оскільки складові загальної похибки складаються, а коефіцієнти впливу (вагові коефіцієнти) кожної складової дорівнюють одиниці.

Проведемо уточнення складових рівняння (5.5) за таким принципом. Будемо користуватись поняттями номінальних та дійсних величин. Під номінальною розуміємо таку, яка задана у нормативних документах на прилад, а дійсна – це та, яка сформувалась у процесі його виготовлення і встановлена відповідними дослідженнями щодо виконання дій наявним приладом.

Функція перетворення сигналу (*ФПС(FTS)*) приладом у загальному вигляді представляється так:

$$y = f\left(x, q_{is}\right). \qquad (5.6)$$

Тут: x – дійсне значення фізичної величини (параметр фізичного поля), яка підлягає вимірюванню, а q_{is} – дійсне значення параметрів ланок перетворення сигналу приладом, i – кількість ланок перетворення, s – параметр окремого елемента i – ланки.

Нехай x^0 – номінальне значення вимірюваної величини, яке підлягає вимірюванням; якщо прилад телеметричний, тобто об'єкт вимірювання знаходиться на деякій віддалі, то дійсне значення внаслідок проходження каналу передачі інформації дещо спотвориться, тобто на вхід приладу надійде величина x; q_{is}^0 – номінальні параметри ланок приладу на початку експлуатації, q_{is}^t – зміна параме-

трів ланок з часом експлуатації та при відхиленні умов експлуатації від номінальних (відхилення температури оточення від номінальної тощо).

Отже, x^0 , x – номінальне та дійсне значення вхідної координати, q_{is}^0, q_{is} – номінальні та дійсні параметри ланок, q_{is}^t – зміна параметрів ланок приладу в процесі експлуатації (часові зміни).

Враховуючи вище зроблені уточнення, окремі складові сумарної похибки, яка представлена рівнянням (5.5), запишуться:

$$\begin{aligned}
\Delta y_{\Delta f} &= f\left(x^o, q_{is}^o\right) - f_o\left(x^o, q_{is}^o\right);\\
\Delta y_{\Delta q} &= f_o\left(x^o, q_{is}\right) - f_o\left(x^o, q_{is}^o\right);\\
\Delta y_{\Delta t} &= f_o\left(x^o, q_{is}^t\right) - f_o\left(x^o, q_{is}^o\right);\\
\Delta y_{\Delta x} &= f_o\left(x\ , q_{is}^o\right) - f_o\left(x^o, q_{is}^o\right).
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Зазначимо, що з наведених похибок найбільшу вагу має друга група похибок – це похибки виготовлення та складання елементної бази, – *технологічні* похибки. Їх також називають *первинними* похибками.

З такими уточненнями строга (номінальна) *ФПС(FTS)* запишеться у такому вигляді:

$$y_0 = f_0\left(x^0, q_{is}^0\right). \tag{5.8}$$

Наближена (реальна) *ФПС* запишеться так:

$$y\ = f\ \left(x^0, q_{is}^0\right). \tag{5.9}$$

Отже, у формулах (5.7) $\Delta y_{\Delta f}$ – теоретична похибка, зумовлена заміною строгої функції перетворення сигналу f_0 наближеним значенням f ; $\Delta y_{\Delta q}$ – похибки у виготовлені параметрів окремих ланок (та їх складанні); $\Delta y_{\Delta t}$ – похибки, викликані зміною параметрів окремих ланок у процесі експлуатації; $\Delta y_{\Delta x}$ – похибка зчитування сигналу – зміна величини сигналу при його проходженні від джерела до датчика фізичної величини.

Висновки за рубрикою: структуризація кінцевої похибки роботи приладів у вигляді складових (5) дає можливість:

1) виявити можливі причини неточності роботи приладів;

2) встановити внесок кожного з видів похибок;

3) розробити комплекс заходів щодо мінімізації кінцевої похибки.

5.4. Методи визначення похибок

Аналітичний метод. При проєктуванні приладів проводиться оцінка похибки роботи приладу з метою виявлення найбільш впливових чинників неточності. Аналітичний метод у теорії точності базується на методі розкладу функцій

у ряд Тейлора з частинним диференціюванням по змінним параметрам. Як відомо, суть методу – це розклад деякої функції у ряд у околі змінного аргументу з частинним диференціюванням. Продемонструємо його на прикладі другої групи похибок – технологічних.

Записуємо *ФПС* приладу так: $y_{\Delta q} = f_o\left(x^0, q_{is}\right)$. Тут x^0 – істинне (номінальне) значення інформаційного параметра фізичного поля, яке підлягає вимірюванню; q_{is} – дійсне значення i – параметра s – ланки перетворення сигналу (у відповідності до рубрики2.3.2). Числове значення параметра $q_{is} = q_{is}^0 + \Delta q_{is}$, тобто складається з суми номінального значення q_{is}^0 та неточності виготовлення Δq_{is} .

Проведемо розклад *ФПС* приладу в ряд Тейлора в околі номінального параметра q_{is}^0 . Буде:

$$y_{\Delta q} = f_o\left(x^o, q_{is}\right) = f_o\left(x^o, q_{is}^o + \Delta q_{is}\right) = f_o\left(x^o, q_{is}^o\right) + \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial y}{\partial q_{is}}\right)\Delta q_{is} + \cdots. \qquad (5.10)$$

Тут ми обмежилися двома членами розкладу, відкинувши наступні зі степенями вище першої з причин малості Δq_{is} .

Отже, перший член розкладу, тобто $f_o\left(x^o, q_{is}^o\right)$, є *ФПС (FTS)* ідеального приладу. Перенесемо цю складову в рівнянні (5.10) у ліву частину. Очевидно, що похибка роботи приладу, зумовлена неточністю виготовлення деякого параметра окремого елемента, буде:

$$\left|\Delta y_{\Delta q}\right| = f_o\left(x^o, q_i\right) - f_o\left(x^o, q_i^o\right) = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial y}{\partial q_{is}}\right)\Delta q_{is}. \qquad (5.11)$$

Як бачимо, вираз у лівій частині, відповідно до другого рівняння системи (9) (за модулем), дорівнює технологічній похибці (тип "В").

Аналогічно можна записати для довільної складової похибки. Наприклад, для теоретичної похибки формула (5.11) набуде вигляду:

$$\left|\Delta y_{\Delta f}\right| = f_o\left(x^0, q_{is}^0\right) - f\left(x^0, q_{is}^0\right) = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial y}{\partial f_i}\right)\Delta f_i \ . \qquad (5.12)$$

Формули (5.11), (5.12) –окремі випадки узагальнюючих математичних процедур, розвинутих в [1-5], які випливають з розкладу функцій у ряд Тейлора при багатьох параметричних змінних. В більшості випадків функція перетворення сигналу є параметричною функцією багатьох змінних, сортування похибок за видами не здійснюється, а користуються частинним диференціюванням за змінними параметрами.

Нехай функція перетворення сигналу є параметричною функцією багатьох змінних [14]: $u = f\left(x, y, z, ..., w\right)$.

Тоді приріст цієї функції визначається частинним диференціюванням, тобто

$$\Delta u = \left(\partial f / \partial x\right)_{x0} \Delta x + \left(\partial f / \partial y\right)_{y0} \Delta y + \left(\partial f / \partial z\right)_{z0} \Delta z + \ldots + \left(\partial f / \partial w\right)_{w0} \Delta w. \quad (5.13)$$

Тут $\Delta u, \Delta x, \Delta y, \Delta z, \ldots, \Delta w$ – складові похибок, а

$\left(\partial f / \partial x\right)_{x0}, \left(\partial f / \partial y\right)_{y0}, \left(\partial f / \partial z\right)_{z0}, + \ldots + \left(\partial f / \partial w\right)_{w0}$ – частинні похідні, числове значення яких обчислюють при фіксованих значеннях координат $x_0, y_0, z_0, \ldots, w_0$.

Зробимо акцент на технічному змісті вище наведених частинних похідних. Як вище зазначалось (Ч.2), частинна похідна від функції перетворення сигналу $y = f\left(x, q_{is}\right)$ за вхідною координатою x називається передавальною функцією приладу:

$$A_{yx} = \frac{\partial y}{\partial x}. \quad (5.14)$$

Якщо ж диференціювання виконується за функціональним параметром *i*-елемента *s*-ланки, тобто

$$A_{q_{is}} = \frac{\partial y}{\partial q_{is}} \quad (5.15)$$

то ця величина носить назву «функція технологічної похибки» і являє собою *фундаментальне рівняння лінійної теорії точності*.

В цих поняттях сумарна величина технологічної похибки запишеться [48]:

$$\left|\Delta y_{\Delta q}\right| = \sum_{s=1}^{m} \left[\sum_{i=1}^{n} A_{q_{is}} \Delta q_{is} \right] \quad (5.16)$$

Із формули (5.16) випливає, що кінцеве значення технологічної похибки виготовлення деякої системи (приладу) з мультипараметричною елементною базою отримується подвійним сумуванням неточності виготовлення кожного параметра окремого елемента (у дужках) зокрема і всіх елементів у цілому.

Наразі, якщо кінцевий вигляд *ФПС (FTS)* невідомий, а структура приладу розроблена методом моделювання, то значення похибок знаходять шляхом *графічного диференціювання* експериментально побудованої залежності $y = f\left(x, q_{is}\right)$ як параметричного рівняння. Такий підхід, очевидно, можливий лише при наявності виготовленого зразка приладу, на якому і проводять такі випробування.

5.5. Аналіз видів похибок

5.5.1. Теоретичні похибки $\Delta y_{\Delta f}$ (похибки групи „А”)

Природа теоретичних похибок така:

1) схемні теоретичні похибки, які виникають унаслідок заміни строгої *ФПС (FTS)* наближенням, оскільки в багатьох випадках реалізувати строгу *ФПС*

технічно дуже складно або ж взагалі неможливо;

2) параметричні похибки, які виникають унаслідок заокруглення числових параметрів елементної бази; ці заокруглення здійснюються з таких причин:
   – появи ірраціональних чисел при розрахунках розмірів (параметрів);
   – вимоги стандартів на числові параметри, такі як модуль зубчатих коліс, крок різьби і т. ін.;
4) конструктивні припущення; побудова *ФПС* приладів здійснюється в припущеннях, що контактна взаємодія елементів розглядається як математичні точки або лінії, тоді як в реальності зусилля передають через круглі площадки, або прямокутники внаслідок пружних деформацій та наявності реальної мікрогеометрії поверхонь контакту.

5.5.1.1. Схемні теоретичні похибки

Такі похибки виникають при заміні строгої *ФПС* наближеним значенням. Їх аналіз проведемо на реальному прикладі, відповідно до [6].

У свій час виникла потреба у недорогому високоточному приладі лінійних вимірювань, з інтервалом вимірювання {0÷1} *мм*, ціною проділки 1 *мкм*. Як механізм перетворення лінійного руху в обертовий вирішено використати важільну схему тригонометричних механізмів як альтернативу зубчасто-рейковому, використаному в індикаторі годинниковому типу ІЧ, точність перетворення якого невисока.

Серед тригонометричних механізмів перетворень лінійного руху в обертовий відомі важільні схеми синусного або тангенсного виду (рис.5.2). При цьому виникає проблема вибору схеми механізму – тангенсний чи синусний? Ця проблема розв'язується аналізом на точність перетворення, в основі якого лежить розклад тригонометричних функцій в ряд.

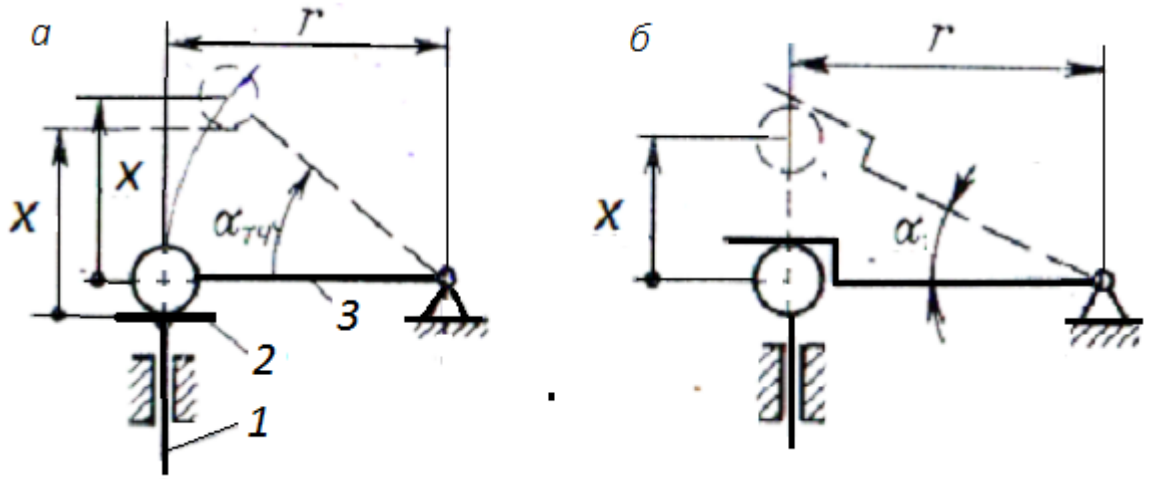


Рис. 5.2. Кінематичні схеми тригонометричних механізмів перетворення лінійного руху в обертовий:
а – синусна схема, *б* – тангенсна

Синусна схема. Лінійний рух *x* вимірювального стрижня *1* з тарілкою 2 призводить до обертання важеля 3 довжиною *r* на кут *α*. Вказані параметри пов'язані поміж собою формулою $x/r = \sin\alpha$, або ж

$$\alpha_{тч} = \arcsin\,(x/r)\,, \tag{5.17}$$

$\alpha_{тч}$ – точне значення кута.

Лінеаризація функції (5.17) полягає в заміні строго значенням його наближенням у вигляді першого члена розкладу, тобто $\alpha_{нб} = x/r$. Отже, похибка визначення кута при заміні строгого вигляду наближенням буде:

$$\Delta\alpha_{тр} = \alpha_{тч} - \alpha_{нб} = \arcsin\,(x/r) - x/r. \tag{5.18}$$

Тангенсна схема. За аналогією з *sin* - схемою,

$$\Delta\alpha_{тр} = \alpha_{тч} - \alpha_{нб} = \arctan(x/r) - x/r. \tag{5.19}$$

Значення теоретичних похибок знаходиться розкладом тригонометричних функцій у ряд Тейлора (обмежимось двома членами розкладу).

Для *sin* - функції:

$$\Delta\alpha_{тр} = \arcsin(x/r) - x/r = x/r + \frac{1}{6}\left(x/r\right)^3 - \ldots - x/r \approx \frac{1}{6}\left(x/r\right)^3. \tag{5.20}$$

Для *tan* - функції:

$$\Delta\alpha_{тр} = \arctan(x/r) - x/r = x/r - \frac{1}{3}\left(x/r\right)^3 + \ldots - x/r \approx -\frac{1}{3}\left(x/r\right)^3. \tag{5.21}$$

Отже, *sin* - схема показує похибку вдвічі меншу, ніж *tan* - схема. На підставі цього і була обрана синусна схема механізму перетворення лінійного руху в обертовий.

Прилад отримав назву 1МИГП-1; кінематична схема показана на рис. 5.3.

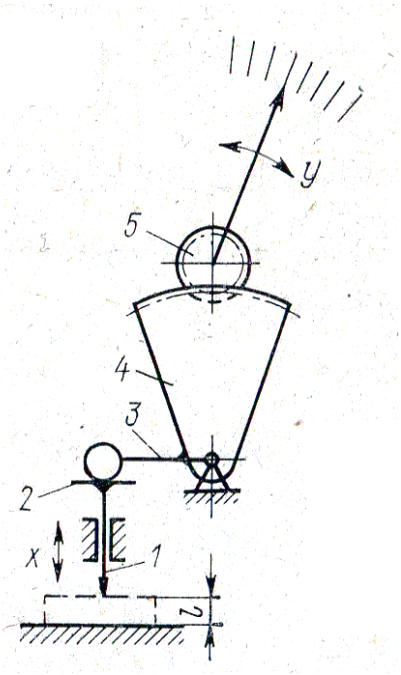


Рис. 5.3. Кінематична схема вимірювального приладу 1МИГП-1:
1 – вимірювальний стрижень;
1 – тарілка;
3 – важіль;
4 – зубчатий сектор;
5 – зубчата шестерня

Отже, на вході механізму використана *sin* - схема перетворення руху, а на виході – зубчастий механізм: зубчастий сектор 4 та зубчасте колесо 5, причому $z_4 / z_5 = 15$. Легко переконатися, що методом послідовних підстановок можна отримати функцію перетворення руху механізму приладу (обертання стрілки).

Буде:

$$y = \left[z_4 / z_5 \right] \alpha_{тр} . \tag{5.22}$$

Похибка положення стрілки Δy отримується диференціюванням вищенаведеної формули, враховуючи формулу (5.20). Тоді:

$$\Delta y = \left[z_4 / z_5 \right] \Delta\alpha_{тч} \approx \frac{1}{6} \left[z_4 / z_5 \right] \left(x / r \right)^3 . \tag{5.23}$$

Отже, для визначення *схемної теоретичної похибки* необхідно встановити точну ФПС пристрою ($y_{тч}$), яка в більшості випадків буде нелінійною; далі необхідно визначитись наближеною ФПС ($y_{нб}$), за допомогою якої виконується лінеаризація точної функції. Теоретична похибка приладу (або іншої технічної системи) $\Delta y_{тр}$ визначається як різниця цих функцій:

$$\Delta y_{тр} = y_{тч} - y_{нб} . \tag{5.24}$$

5.5.1.2. Параметричні похибки

Найбільш яскравим прикладом параметричних теоретичних похибок є аналіз конструкції так званого індикатора годинникового типу (ІЧ), дуже поширеного в техніці лінійних вимірювань. Промисловість випускала чотири типорозміри цих приладів з інтервалами вимірювань {0 ÷ 2}, {0 ÷ 5}, {0 ÷ 10} та {0 ÷ 25} мм. Їх кінематичні схеми показана на рис. 5.4.

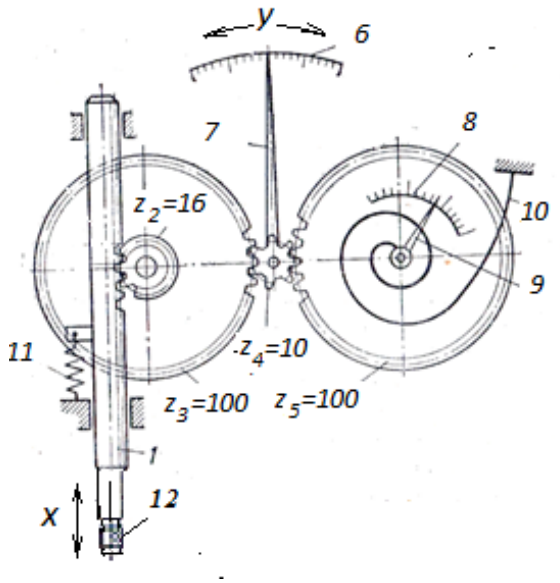


Рис. 5.4. Кінематична схема індикатора годинникового типу:
1 – вимірювальний стрижень; *2, 3, 4, 5* – зубчаті колеса; *6,7* – шкала, стрілка-покажчик 0,01 мм; *8,9* – шкала, стрілка-покажчик 1 мм; *10, 11* – спіральна та циліндричні пружини компенсації мертвого ходу; *12* – наконечник індентора

ФПР механізму (буде показано дещо пізніше) має такий вигляд:

$$y = \frac{2}{mz_2}\frac{z_3}{z_4}x \qquad (5.25)$$

Параметрична похибка − це похибка модуля m зубчастої рейки. Буде показано (рубрика 3.5), що $\Delta m = \left| m_{теор} - m_{пр} \right| \approx 5.6 * 10^{-5}$ [мм].

Ця похибка виникає внаслідок заокруглення, яке здійснюється в таких випадках:

1) при появі ірраціональності в розрахунках, адже виготовлення елементів в кращому випадку не перевищує 10^{-3} мм;
2) при приведенні розрахункових значень до нормованих величин, які регламентовані стандартами.

5.5.1.3. Конструктивні припущення

У деяких випадках складання ФПС пристроїв здійснюється в припущеннях, що вищі кінематичні пари ідеалізовані – взаємодія елементів розглядається як математичні точки або лінії, тоді як в реальності зусилля передають через круглі або прямокутні площадки внаслідок пружних деформацій поверхонь контакту та наявності реальної мікрогеометрії поверхонь. При виконанні такої заміни за конструктивними або технологічними міркуваннями конструктор робить припущення, яке веде до похибки, що належить до теоретичних [6, 9].

1.3. Заокруглення числових параметрів

Заокруглення числових параметрів проводиться в таких випадках:

- при появі ірраціональності в розрахунках, адже виготовлення елементів в кращому випадку не перевищує 10^{-3} мм;
- при приведенні розрахункових значень до нормованих величин, які регламентовані стандартами.

5.5.2. Технологічні (первинні) похибки $\Delta y_{\Delta q}$ (похибки групи „В”)

5.5.2.1. Вступні поняття

У період становлення розрахунків на точність основною причиною неточності назвали технологічну. Особливістю технологічних похибок є їх домінуючий характер над іншими видами похибок; свого часу вони отримали назву «первинні похибки». До технологічних похибок (*ТП*) відносять ті, які зумовлені процесом виробництва окремих деталей. Очевидно, що технологічні причини індивідуальні для кожної з груп виробів, які класифікують, як зазначалось, за фізичними принципами перетворення сигналу (механічні, електромагнітні, оптичні). Для оптико-механічних систем причиною технологічних похибок є:

– похибки відхилення дійсних розмірів від номінальних;
– похибки відхилення форм поверхонь від номінальних та похибки відхилення розміщення деяких поверхонь окремих деталі від номінального;
– похибки складання, тобто похибки у взаємному розміщенні окремих деталей, вузлів.

Розрізняють: *скалярні* технологічні похибки, які носять ймовірнісний характер, та *векторні ТП* , які мають накопичувальний характер.

Скалярні – неточність виготовлення зумовлена статистичним розсіюванням геометричних розмірів при виготовленні ± від номінального значення.

Векторні – однонаправлене зміщення деякого параметра в «+» або в «-» від номіналу. Векторний характер викликається односторонньою дією чинників: деформація від сил ваги деталей, одностороннє відхилення допусків на розміри, односторонній допуск міжосьових розмірів на обертових деталей спряження, ексцентриситети. У розрахунках на точність при скалярних похибках враховується лише їх величина, а при векторних – як величина, так і напрям.

Похибки розмірів є скалярними первинними похибками і викликають накопичення похибок переміщення та відхилення швидкостей ведених ланок. Приклади скалярних похибок: профіль кулачка, крок різьби.

Похибки розташування робочих поверхонь, а також складальні зсуви і перекоси бувають як скалярні, так і векторні; у першому випадку вони викликають накопичення похибки переміщення і відхилення швидкостей, а в другому – періодичні похибки переміщення і коливання швидкостей.

Похибки форми робочих поверхонь зумовлюють завжди перемінні нерегулярні похибки переміщення і коливання швидкостей.

У розрахунках на точність при скалярних похибках враховується лише їх величина, а при векторних – як величина, так і напрям.

5.5.2.2. Розрахунки скалярних технологічних похибок

Характер прояву цих похибок випадковий, як зазначалось вище, тому їх розрахунок ведеться за імовірнісними характеристиками розсіювання відповідно до передбачуваних законів розподілу похибок, що визначаються характеристиками поля допуску (табл.5.1) [48].

Значення коефіцієнтів, які указані у примітках до табл. 5.1, обчислюються за схемою та формулами, наведених в табл. 5,2, 5.3, 5.4. Окрім цитованої [48], алгоритм розрахунків можна знайти у літературі [6, 40, 43–45].

Оскільки кожен екземпляр приладу складений із незалежно виготовлених деталей, похибки виготовлення яких різняться, то і кінцева похибка кожного екземпляру приладу буде відрізнятися.

Тому, в зв’язку зі зростаючими вимогами до якості приладів та для забезпечення прогнозованих показників їх точності, використовують такі прийоми:
– встановлення регуляторів та компенсаторів;
– метод підгонки замикаючої ланки перетворення сигналу.

5.5.3. Похибки експлуатації $\Delta y_{\Delta t^0}$ (група „С”)

Виникають у процесі експлуатації і зводяться до:

- змін параметрів функціональних елементів унаслідок температурних дій, особливо датчиків фізичних величин;
- температурних деформацій окремих ланок, особливо металевих виробів;
- появи додаткових сил тертя в кінематичних парах, які в багатьох випадках виходять за допустимі межі;
- появи понад нормованих шпарин у кінематичних парах внаслідок їх зносу при тривалій експлуатації.

Позаяк експлуатаційні похибки цілком прогнозовані, то для їх врахування конструктивно передбачають і проєктують різноманітні *компенсатори* та *регулятори* таких похибок, що насамперед стосується механічних та оптико-механічних систем [6, 45].

Таблиця 5.1

Імовірнісні характеристики розсіювання технологічних похибок *[48]*

Найменування характеристик	**Позначення**	**Розрахункові формули**
Половина поля допуску	δq	$\delta q = 0{,}5(ES - EI)$
Середнє значення	$\overline{\Delta q}$	$\overline{\Delta q} = \Delta_0 q + \alpha_q \delta q = C_q \delta q$
Середнє квадратичне відхилення	$\sigma(\Delta q)$	$\sigma(\Delta q) = \frac{1}{3} K_q \delta q$
Примітки. *ES* і *EI* – верхнє і нижнє граничні відхилення поля допуску отвору (при розрахунках підставляються зі своїми знаками); $\Delta_0 q = 0{,}5(ES + EI)$ – координата середини поля допуску отвору; α_q – коефіцієнт відносної асиметрії поля розсіювання похибки; C_q – коефіцієнт асиметрії поля допуску; K_q – коефіцієнт відносного розсіювання похибки в полі допуску.		

Таблиця 5.2

Розрахункові формули для коефіцієнта асиметрії поля допуску C_q *[48]*

Розташування поля допуску	**Формула** C_q
Однобічне з гарантованим відхиленням	$C_q = \Delta_0 q / \delta q \mp \alpha_q$
Те ж, але без гарантованого відхилення	$C_q = \pm 1 \mp \alpha_q$
Симетричне розташування поля допуску	$C_q = 0$
Примітка. Значення $\Delta_0 q$ і δq обчислюються за формулами табл. 5.1 і підставляються зі своїми знаками. Верхні знаки у формулах стосуються до розмірів типу «отвір», а нижні – розмірів типу «вал».	

Таблиця 5.3

Значення коефіцієнтів α_q і K_q векторних первинних похибок

Закон розподілу первинної похибки	**α_q**	**K_q**
При розподілі за законом Релея При розподілі за законом модуля різниці	– 0,28 – 0,30	1,14 1,30

Таблиця 5.4

Значення коефіцієнтів α_q і K_q скалярних первинних похибок

Розташування поля допуску	**Метод обробки**	**Рівень точності[3]**	***αq***	***Kq***
Симетричне	–	Е В Т	0 0 0	1 1,1 – 1,3 1,3 – 1,5
Несиметричне	Автоматичний	Е В Т	0 0,0 – 0,1 0,1 – 0,2	1 1,1 – 1,2 1,2 – 1,3
Несиметричне	Пробними проходами	Е В Т	0,1 – 0,2 0,2 – 0,3 0,3 – 0,4	1,1 – 1,2 1,2 – 1,3 1,3 – 1,4

Примітки. 1. Дано усереднені значення α_q і K_q ; при їхньому виборі необхідно керуватися конкретним станом устаткування.
2. Для α_q зазначені абсолютні значення; знак повинний вибиратися за правилом: мінус – для розмірів типу «отвір» , плюс – для розмірів типу «вал».
3. Розрізняють такі рівні точності виготовлення елементів деталей:
економічний (Е); виробничий (В); технічний (Т)

5.5.4. Похибки зчитування (реєстрації) сигналу $\Delta y_{\Delta x}$ (група „D”)

Зміст похибок. Ці похибки викликаються такими групами причин:

- *об’єктивними*:

  1) спотворенням істинного значення інформаційного параметра при проходженні сигналу від джерела до приймача інформації (телеметричні системи);

  2) вплив приймача сигналу на фізичне поле, що підлягає вимірюванню;

  3) принципом зчитування (аналоговий, цифровий).

- *суб’єктивними:*

  обмеження психофізіологічних можливостей оператора;

- *методичними:*

  похибки представництва.

5.5.4.1. Спотворення істинного значення інформаційного параметра

Механіка:

Похибки положення ланок при прямому $\Delta y_{прям.}$ та при оберненому $\Delta y_{оберн.}$ ходах – похибки мертвих ходів: $\Delta y_{\Delta x} = \Delta y_{прям.} - \Delta y_{оберн.}$.

Причини:

– пружні деформації контактуючих ланок передачі зусиль, які є причиною додаткових мертвих ходів;
– шпарини у кінематичних парах, які породжують радіальне та осьове зміщення елементів цих пар.

Електрика, причини:

– падіння електричної напруги на лініях зв'язку.

Електроніка, причини:

– розсіяння сигналу в середовищі поширення або вздовж ліній зв'язку;
– фоновий шум (завади), що спотворює інформаційну складову, породжений змінними електричними, магнітними та електромагнітними полями оточення.

Оптика:

– турбулентність каналу поширення оптичного випромінювання;
– спотворення сигналу внаслідок світлових фонових дій;
– зміна показника заломлення матеріалу функціонального елемента при температурних діях.

5.5.4.2.Методичні похибки – похибки представництва [11]

Ці похибки виникають при потребі вимірювання масштабних фізичних полів датчиком обмеженого розміру .

Найзрозумілішим прикладом цих похибок є вимірювання температури приміщення в деякій зоні з наступним поданням цього результату як міра температурного поля всього приміщення. Схожа ситуація має місце майже завжди при вимірюваннях, коли з допомогою невеликої кількості датчиків (переважно з одним) необхідно провести вимірювання середнього значення об'ємного фізичного поля.

Ще складніша ситуація – це контроль нестаціонарних полів: теплових потоків, електромагнітних збурень, тощо.

5.6. Корекція показань приладу внаслідок зовнішніх збурень

Корекція результатів вимірювання приладом при наявності зовнішніх завад здійснюється за такими принципами: 1) екрануванням завад, 2) компенсацією впливів, 3) введенням зворотних зв'язків.

Розрізняють адитивні та мультиплікативні завади. Адитивні – такі, розмір яких не залежить від абсолютного значення вимірювальної величини, аналогічно

поданим на рис. 5.1, *а*. Мультиплікативні володіють нарощуваними властивостями (рис. 5.1, *б, в)*, тобто зі зростанням вимірювальної величини зростає і величина завад. *Принцип екранування завад*. Найефективніший спосіб – це усунення впливів за допомогою екранування – розміщення, тобто ізоляція вимірювальної системи у кожух з відповідного матеріалу, який запобігає впливам зовнішніх адекватних фізичних завад.

Принцип компенсації впливів. Цей принцип полягає в тому, що дія збурення зовнішніх впливів залишається, але результат цієї дії обчислюється, вимірювання основного параметра компенсується названими обчисленнями.

Компенсація адитивних завад відносно нескладна, оскільки їх дія додається до вимірювального сигналу; корекція зводиться до відповідного алгебраїчного віднімання. Компенсація мультиплікативної дії складніша, необхідна додаткова обробка інформаційного сигналу і сигналу завад за допомогою спеціального обчислювача.

Показовим прикладом усунення температурних впливів є компенсація зміщення показань відлікової шкали довжин хвиль спектрального приладу з призмовою системою дисперсії від номінального положення внаслідок зміни показника заломлення матеріалу призми при зміні температури. Зміна температури оточення $\Delta t = \pm 5^0$ викликає зміну показника заломлення матеріалу призми, що відповідає повороту столика призми на $\pm 10''$.

На рис.5.5 показана кінематична схема приводу обертання спектральної призми для спектрофотометра СФ-16 [46].

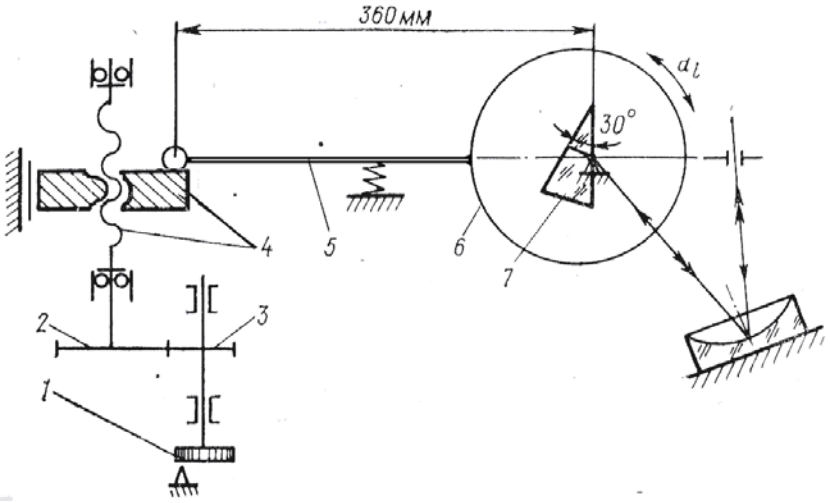


Рис. 5.5. Компенсація температурних впливів на спектральну шкалу відліку:
1 – відлікова спектральна шкала;
2, 3 – зубчаті колеса;
4 – гвинтова передача;
5 – біметалевий важіль, нерухомо сполучений з поворотним столиком *6*;
7 – кварцова призма

Як компенсатор впливу температури використовується біметалевий важіль 5, який при зміні температури оточення вигинається й у такий спосіб додатково провертає столик у потрібному напрямку. Але показник заломлення призми та його температурний приріст відрізняються вздовж спектрального інтервалу, а біметалевий важіль розраховується для деякого середнього значення; тому наперед прогнозується деяка похибка компенсації у всьому спектральному діапазоні.

5.7. Розрахунки параметрів ланок перетворення руху та похибок виконання дій

5.7.1. Класифікація похибок механізмів

При проєктуванні довільних механізмів [9, 28, 41, 48], а особливо точних приладів, разом з кінематичними і динамічними розрахунками необхідно проводити розрахунки на точність, а при неможливості строгих розрахунків – хоча б їх оцінку. Одночасно з визначенням характеристик точності ці розрахунки дозволяють оптимізувати спряження конструктивних елементів, їх розміри, з наступним встановленням допусків на виготовлення і складання механізму. Похибки механізмів – змінні величини, які спостерігаються як в межах діапазону переміщення, так і при повторенні циклів руху та з часом експлуатації.

Зміни в *межах діапазону переміщення* викликаються переважно нелінійністю функції перетворення руху, а при лінійних перетвореннях – накопиченням похибки зі зростанням діапазону переміщення. *Розсіювання похибок при повторенні циклів руху* виникає внаслідок деформацій, люфтів і мінливості тертя в кінематичних парах. *Зростання похибок з часом* виражається в поступовому зниженні точності механізмів унаслідок зносу деталей, ослаблення кріплень і розладу складальних регулювань. *Ступінь зниження точності в часі* – одна з характеристик надійності механізмів узагалі і точних приладів зокрема.

Основними причинами неточності механізмів є похибки *переміщення*, *мертвий хід* і *похибки швидкості* веденої ланки. *Похибка переміщення* являє собою різницю між дійсним і розрахунковим значеннями переміщення веденої ланки і характеризує відхилення від заданого закону руху; в межах циклу проявляються як місцево, так і періодично, з властивостями накопичення. *Мертвим ходом* називають запізнення у русі веденої ланки, що виникає при реверсуванні руху. *Похибка швидкості* характеризує відхилення від рівномірності в русі та коливання швидкості веденої ланки, переважно двостороннє. Перелічені види похибок називають *кінематичними*.

У приладах, що працюють в умовах вібрацій, виникають *динамічні* похибки, що виявляються як додаткові зміщення веденої ланки механізму і викликають «розмиття» зображень, «відведення» шкал або стрілок (оптичні прилади).

5.7.2. Розрахунки параметрів ланок перетворення руху індикатора годинникового типу

Кінематична схема механізму будується за конструктивним виглядом **(**рис. 5.4**).** Вхідною ланкою є вимірювальний стрижень *1*, який має лінійну напрямну і здійснює поздовжнє переміщення в напрямних опорах. Вихідне положення стрижня, при якому показання приладу нульові, нижнє. Його самовільний вихід у це положення забезпечується спіральною пружиною 11, яка працює на розтяг. У

центральній зоні поверхні стрижня нарізана зубчата рейка. Остання зчеплена із зубчатим колесом z_2, яке нерухомо з'єднано з колесом z_3. Це колесо зчеплене з колесом z_4, до якого нерухомо приєднана стрілка 6 сотенної шкали (циферблат – кругова шкала). Наступне, колесо z_4, виконує пасивну функцію. Але, саме до цього колеса нерухомо приєднана стрілка міліметрової шкали 9, оскільки з ним скріплена спіральна пружина 4 (пружинна волосінь), яка створює момент протидії руху вимірювального стрижня уверх, від начального положення, а також протидію обертанню попередніх зубчатих коліс, що забезпечує односторонній контакт зубців у зчепленнях, у такий спосіб компенсується мертвий хід коліс (люфт зубчатих зчеплень).

Функція перетворення руху (ФПР). Кінематична схема механізму індикатора складена з двох кінематичних ланцюгів, у яких здійснюється перетворення руху: «зубчата рейка - зубчате колесо 2» та «зубчате колесо 3 - зубчате колесо 4». Ці ланцюги сполучені послідовно. Отже, ФПР механізму приладу отримується методом послідовних підстановок.

Легко переконатися (переписуємо ф-лу 5.25) , що

$$y = \frac{2}{mz_2}\frac{z_3}{z_4}x. \tag{5.25}$$

Тут m – модуль зубчатої пари «зубчата рейка – зубчате колесо 2».

Враховуючи, що $m = P_t/\pi$, отримаємо такий вираз для ФПР:

$$y = \frac{2\pi}{P_t\, z_2}\frac{z_3}{z_4}x, \tag{5.26}$$

p_t – подільний крок зубчастої рейки, що строго відповідає окружному кроку зубчатого колеса z_2, яке вступає у зчеплення з зубчатою рейкою.

У такому записі вихідна координата y – це кутове переміщення стрілки 6 (у градусній мірі, якщо $\pi = 180°$), яка нерозривно сполучена з зубчастим колесом 3, при переміщенні вимірювального стрижня на відстань x.

Розрахунки параметрів ланок механізму ІГ. В основу розрахунків закладені технічні умови (ТУ) на прилад. Нехай, як це зроблено у всіх типорозмірах індикатора, кругова шкала циферблата розбита на 100 проділок. Величина кута (інтервал), що припадає на одну проділку, буде: $\Delta y_{інтерв.} = 2\pi/100.$ Приймаємо, що мінімальне значення вимірюваного лінійного інтервалу, отже, і ціна проділки, $\Delta x_{ц.пр.} = 0{,}01\,мм.$

Отже, чутливість ІГ, тобто масштаб перетворення вимірюваної величини, буде:

$$S_{yx} = \frac{\Delta y_{інтерв.}}{\Delta x_{ц.пр.}} = \frac{2\pi}{100}\,\frac{1}{0{,}01} = 2\pi\ мм^{-1}. \tag{5.27}$$

Для узгодження параметрів ланок механізму необхідно встановити передаточну функцію $A_{yx} = \Delta y / \Delta x$, яка отримується диференціюванням ФПР (ф-ла (3.1)):

$$A_{yx} = \frac{2}{m z_2} \frac{z_3}{z_4}. \qquad (5.28)$$

Прирівняємо праві частини (5.27) та (5.28), позаяк за визначенням (та й за змістом) ці величини тотожні: S_{yx} – експериментальне значення, а A_{yx} – теоретичне.

Це дає змогу математично пов'язати параметри ланок механізму, а саме:

$$2\pi = \frac{2}{m z_2} \frac{z_3}{z_4}. \qquad (5.29)$$

Якщо використати зв'язок модуля з окружним кроком ($m = p_t / 2\pi$), отримаємо:

$$2\pi = \frac{2\pi}{p_t z_2} \frac{z_3}{z_4}, \text{ або ж } \quad p_t z_2 = \frac{z_3}{z_4}. \qquad (5.30\ а,\ б)$$

Для індикатора з вимірювальними межами {0÷10} мм як результат конструктивних рішень було прийнято, що $z_3 = 100$, а $z_4 = 10$. Бачимо, що такі величини забезпечать десятикратний масштаб перетворення, тобто при одному оберті колеса 3, з яким нерухомо з'єднана стрілка міліметрової шкали, зубчате колесо 4, з яким нерухомо закріплена стрілка сотенної шкали, обернеться десять разів. Тоді $P_t z_2 = 10$; якщо ж $z_2 = 16$, окружний крок зубчатої рейки P_t буде дорівнювати 0,625 мм.

Із рівності (9.5) знаходимо, що

$$m = \frac{1}{\pi} \frac{1}{z_2} \frac{z_3}{z_4} = \frac{1}{\pi} \frac{10}{z_2}. \qquad (5.31)$$

Розрахунок показує, що при $z_2 = 16$, теоретичне значення модуля $m_{теор.} = 0{,}19894367886...$; на практиці таке ірраціональне значення реалізувати неможливо. Тому в існуючому індикаторі прийняте спеціальне значення $m_{пр} = 0{,}199$ мм; найближчий в стандартному ряду – модуль m = 0,2 мм.

Параметрична похибка. Виходячи з вище наведеного, відхилення модуля як конструктивного параметра від теоретично розрахованого складатиме:

$$\Delta m = \left| m_{теор} - m_{пр} \right| = \left| 0.19894367886 - 0.199 \right| \approx 5.6 * 10^{-5}\ мм. \qquad (5.32)$$

Таке заокруглення наперед передбачає похибку роботи ІГ, яку ми і відносимо до групи параметричних. Знайдемо похибку вимірювання величини *x* унаслідок такого заокруглення. Для цього проведемо диференціювання залежності $x = \frac{m z_2}{2} \frac{z_4}{z_3} y,$ за параметром Δm; ця залежність одержана оберненим перетворенням з формули 3.1. Отже,

$$\Delta x_{\Delta m} = \frac{z_2}{2}\frac{z_4}{z_3} y\,\Delta m, \tag{5.33}$$

Приведемо праву частину до входу. Для цього використаємо функцію перетворення руху; очевидно, що $\frac{z_2}{2}\frac{z_4}{z_3} y = \frac{x}{m}$. Вказане приведення буде полягати у відповідній заміні.

Отже: $$\Delta x_{\Delta m} = \frac{x}{m}\Delta m. \tag{5.34}$$

Обчислимо цю похибку при конструктивному значенні модуля $m = 0.199$ та при вимірювальних межах x = 10 мм. Тоді:

$$\Delta x_{\Delta m} = \left(\frac{10}{0.199}\right)\cdot 5.6\cdot 10^{-5} \approx 0.0028 мм, \tag{5.35}$$

тобто похибка не перевищує 3 мкм. Якщо ж призначити стандартний модуль $m_{пр} = 0{,}2\,мм$, то $\Delta m = \left|m_{теор} - m_{пр}\right| \approx 1.06 * 10^{-3}\,мм$.

Тоді розрахунки похибки за формулою (5.34) дадуть:

$$\Delta x_{\Delta m} = \left(\frac{10}{0.2}\right)\cdot 1.06\cdot 10^{-3} \approx 0{,}053\,мм, \tag{5.36}$$

тобто у п’ять разів перевищувала б ціну проділки. З цієї причини і був встановлений спеціальний модуль $m = 0.199\,мм$.

Висновки. Причиною параметричної похибки є ірраціональне значення масштабу перетворення вимірювального ланцюга S_{yx}, що пояснюється ірраціональністю числа π. Така похибка властива всім механічним системам, у яких є перетворення поступального руху в обертовий.

Отже, похибка (5.35) закладена в розрахункову схему приладу, тому вона вважається теоретичною похибкою приладу.

Технологічні похибки ІГ. Як зазначалося, технологічні (первинні) похибки зумовлюються: *1)* неточністю виготовлення, *2)* похибками монтажу елементної бази механізму. Основними елементами механізму ІГ є зубчаті колеса, яким властиві: кінематична похибка, мертвий хід в зачепленні, радіальне биття валиків коліс у напрямних обертання, пружні прогини валиків, температурні деформації. Найбільш впливові кінематичні похибки, зумовлені неточністю виготовлення зубчатих коліс у цілому та кожного із зубців зокрема. Ці похибки мають осцилюючий характер вздовж всього інтервалу вимірювання внаслідок окружної замкнутості зубчатого колеса. Рівень абсолютної похибки, тобто відхилення показань приладу від дійсного значення розміру, який підлягає вимірюванням, залежить від ступеня точності виготовлення зубчатих коліс.

Мертвий хід у зачепленні та радіальне биття коліс мінімізується конструктивно введенням у механізм протидіючих пружин.

Найбільше на точність впливає на зчеплення «зубчата рейка – зубчате колесо 1», адже похибки, які виникають у цій парі, значно підсилюються наступними кінематичними ланцюгами. Визначальним джерелом похибок у цій парі є поперечний (радіальний) люфт вимірювального стрижня, на якому безпосередньо нарізана рейка. Зазначимо, що цей люфт неминучий, оскільки стрижень мусить вільно переміщуватися в поздовжньому напрямку. Внаслідок цього шпарина у зубчатому зачепленні може збільшуватися, що викликає самовільне зміщення стрілки приладу від номінальних показань.

Звернемося до рис. 5.6, де показаний вимірювальний стрижень у вигляді суцільної лінії у напрямних лінійного переміщення. Центр гойдання стрижня незмінний і знаходиться між верхньою та нижньою опорами, тобто величина шпарини у зачепленні визначатиметься величиною шпарин між рухомим стрижнем і проймами напрямних. Крайні положення стрижня зображені штриховою лінією. Нехай стрижень знаходиться у початковому, тобто нижньому, положенні.

Максимальна абсолютна похибка вимірювальної величини складатиме величину Δ_0, тобто різницю у віддалі між крайніми положеннями та нижнім, яку займає стрижень при гойданні відносно незмінного центру О. Якщо стрижень переміщати вверх, аж до крайнього верхнього положення, то абсолютна похибка Δ_l зменшуватиметься обернено зменшенню плеча гойдання l, тобто обернено зростанню інтервалу вимірювальної величини A_l.

Акцентуємо, що верхнє положення стрижня – максимальне значення вимірювальної величини, нижнє – початкове, різниця у цих положеннях – це вимірювальні межі індикатора.

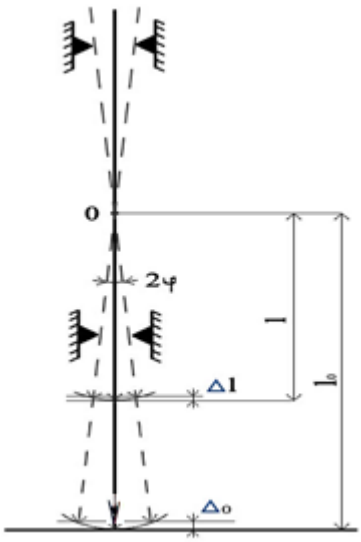


Рис. 5.6. Вплив довжини вимірювального стрижня на точність роботи ІГ:

l_0, l – довжини плечей гойдання стрижня в напрямних лінійного переміщення вимірювального стрижня в початковому та деякому проміжному положеннях;

φ – кут гойдання;

Δ_0 – початкова похибка внаслідок гойдання стрижня;

Δ_l – похибка вимірювання в проміжному положенні (l)

На рис. 5.7 зображений хід експериментальних досліджень точності вимірювань індикатора годинникового типу ІГ, інтервал {0 ÷ 25} мм; як об'єкти досліджень взяті *Міри довжини кінцеві,* номінальні розміри яких рівномірно розподілені в наведених межах. Встановлено, що хід відносної похибки вимірювань зі зростанням номінального розміру мір експонентне спадаючий, що знаходиться у повній відповідності з проведеним аналізом рис. 5.6.

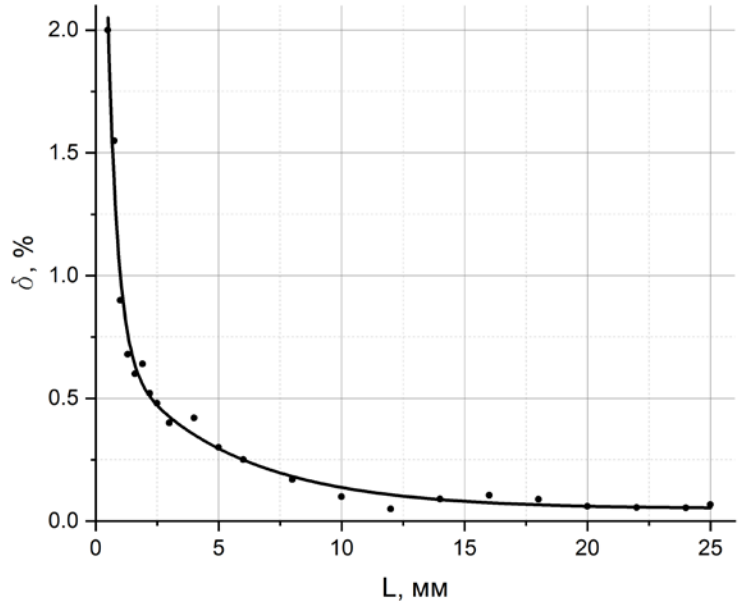


Рис. 5.7. Експериментальні дослідження похибки вимірювань ІГ {0 ÷ 25} мм

5.7.3. Приклади розрахунків похибок.

Дальномір фізичного типу. Для визначення відстані до об'єкта необхідно провести вимірювання часу проходження імпульсу лазерного світла від оператора до об'єкта і відбитого від нього назад, до оператора. Відстань до об'єкта – D, швидкість поширення світла в атмосфері $V = c/n$, де n – показник заломлення середовища поширення ($n \approx 1$), t - час проходження світла в обидва напрями. Очевидно, функція перетворення сигналу запишеться так:

$$D = \frac{ct}{2n}.$$

Змінними величинами є час проходження імпульсу t з похибкою визначення Δt та рефракція атмосфери Δn. За класифікаційними ознаками похибку визначення часу Δt віднесемо до групи технологічних, а рефракцію Δn – до похибок зчитування сигналу.

Для встановлення похибки визначення відстані до об'єкта ΔD проведемо частинне диференціювання за змінними величинами функції перетворення сигналу.

Отже, $$\Delta D = \left|\frac{c}{2n}\right|\Delta t + \left|-\frac{ct}{2}\frac{}{n^2}\right|\Delta n.$$

Мінімальний час, який реєструється радіотехнічними системами, складає приблизно $\Delta t_{\min} = 10^{-9} c$, тобто обробка сигналів проводиться з частотою $\nu = 1 ГГц$. Нехай віддаль $D = 6000\, m$, швидкість поширення світлового імпульсу $C = 3 \times 10^8\, m$, показник заломлення атмосфери $n = 1$. Рефракція атмосфери

$\Delta n = 5 \times 10^{-4}$. Тоді час поширення імпульсу в обидва напрями:

$$t = \frac{2nD}{c} = \frac{2 \cdot 1 \times 6 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = 4 \cdot 10^{-5} \text{сек},,$$

а похибка встановлення віддалі буде:

$$\Delta D = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 1} \times 10^{-9} + \frac{3 \cdot 10^8 \times 4 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 1^2} \times 5 \cdot 10^{-4} = 1.5 \times 10^{-1} + 3 = 3{,}15 m.$$

Аналіз отриманого результату переконливо свідчить, що основним внеском у похибку є рефракція атмосфери, а тому технічні потуги щодо вдосконалення приладу для зменшення часу реєстрації радіоімпульсу безперспективні.

Цим самим ми підтвердили вищенаведений якісний висновок, що розрахунки точності роботи приладів за формулою (5.5) відкривають можливість оцінити вагу окремої складової групи.

Гвинтовий механізм. Знайдемо похибку переміщення координатного столика (мікроскоп тощо), який приводиться в рух гвинтовим механізмом. Функція перетворення руху такого механізму має вигляд:

$$y = \frac{kt}{2\pi} x.$$

Тут y – лінійне переміщення вихідної ланки (гвинт або гайка); k – кількість заходів гвинтової лінії; t – її крок; x – обертовий рух вхідної ланки.

Як випливає з формули, похибка лінійного переміщення Δy викликається двома факторами: похибкою нарізки гвинта Δt (технологічна похибка) і точністю кутової установки приводу обертання вхідної ланки Δx (похибка зчитування сигналу). Частинне диференціювання цієї функції дає:

$$\Delta y = \frac{kx}{2\pi} \Delta t + \frac{kt}{2\pi} \Delta x.$$

Розрахуємо точність установки положення координатного столика (похибку його лінійного переміщення) за один оберт вхідної ланки $x(\varphi) = 360^0$. Нехай кількість заходів $k = 1$, крок гвинта $t = 0{,}5 mm$; похибка виготовлення гвинта Δt $\Delta t = 0{,}5 \times 10^{-3} mm$, похибка встановлення приводу обертання* $\Delta x(\Delta\varphi) = 0{,}5^0$.

Обрахунок показує:

$$\Delta y = \frac{1 \times 360^0}{360^0} 0{,}5 \times 10^{-3} + \frac{1 \times 0.5}{360^0} \times 0{,}5^0 = \left(0{,}5 \times 10^{-3} + \frac{0.5}{360^0} \times 0{,}5^0 \right) \approx 1{,}2 \mu k$$

на одну нитку нарізки. При 50 нитках різьби (25 мм ходу) $\Delta y_\Sigma \approx 60 \mu k$.

Такі розрахунки виявляють ваговий внесок окремих складових неточності,

що дозволяє зробити висновки щодо походження похибок та їх вплив на кінцевий результат. Остаточний результат можна отримати експериментальними дослідженнями точності виконання дій готових виробів з використанням еталонних мір фізичних величин, як це продемонстровано рисунком 5.7.

5.7.4. Установлення функції перетворення сигналу (ФПС) трубчатого манометра та розрахунок похибок

Проведемо розрахунок *ФПС* механічного манометра, що використовується для вимірювання тиску газів і рідин, конструктивний вигляд якого подається на рис. 5.8. Датчиком тиску тут використовується сегмент металевої пружної трубки з поперечним перетином овальної форми.

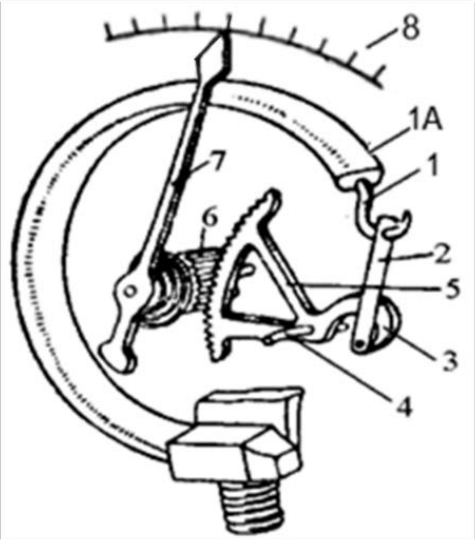


Рис. 5.8. Конструктивний вигляд механічного манометра:
1 – шарнірний наконечник манометричної трубки;
2 – тяга (шатун);
3 – хвостовик зубчастого сектора (криво шип**);**
4 – вісь обертання зубчастого сектора;
5 – зубчастий сектор;
6 – триб механізму обертання стрілки;
7 – стрілка;
8 – шкала

Один її кінець є базовим і впаяний у різьбовий штуцер. З його допомогою порожнина трубки з'єднується із середови-щем, тиск якого підлягає вимірюванню. Під дією різниці зовнішнього p та внутрі-шнього p_0 тисків еліптичний перетин трубки прагне набути круглої форми, внаслі-док чого заглушений вільний кінець переміщується по деякій траєкторії. Це пере-міщення посередництвом передаточних ланок *2, 3, 5, 6* перетворюється в обертовий рух стрілки *7*; відлік тиску здійснюється по шкалі *8*. Кутове переміщення ψ вільного кінця трубчатої пружини в межах пружності матеріалу, з якого вона виготовлена, визначається так:

$$p - p_0 = C\psi. \qquad (5.37)$$

Тут С – жорсткість пружини, яку вважають постійною в межах пружності її матеріалу. *Насправді* жорсткість С змінюється як при зморенні матеріалу, так і при зміні температурних умов експлуатації, що накладає низку спеціальних вимог до матеріалу пружини. Похибки вимірювання тиску, які виникатимуть від указаних змін, належать до групи похибок *експлуатації* $\Delta y_{\Delta t}$. Правила

позначення елементів механізму зберігаємо згідно з рис. 5.8. Координати y_i означають як реальні переміщення ланок механізму, так і кінематичні зв'язки, тобто кінематичні пари. Так, виділяються пари y_1, y_4, y_5, y_6, хоча $x \equiv y_1$, $y_3 \equiv y_4$, $y_6 \equiv y_7$. Необхідність такого виділення полягає в потребі обліку похибок функціонування механізму внаслідок неточності виготовлення цих кінематичних зв'язків, відомих у теорії точності як технологічні (первинні) похибки, які позначають через $\Delta y_{\Delta q}$.

Для встановлення функції перетворення сигналу перейдемо від загального вигляду механізму (рис. 5.8) до його принципової кінематичної схеми – рис. 5.9. З погляду *ТММ,* цей механізм складається з таких простих механізмів: повзунковий (ланки 1, 1А); кривошипно-шатунна передача (ланки 2, 3); зубчасто-секторна передача (ланки 5, 6); індикаторна система (ланки 7, 8). Під вхідною координатою *x* розуміємо різницевий тиск ($p–p_0$). З механічного погляду вхідною ланкою *1* є вільний кінець трубчатої пружини, який по суті здійснює рух по дузі; оскільки це переміщення незначне, то в схемі воно замінюється рухом повзуна по прямій лінії.

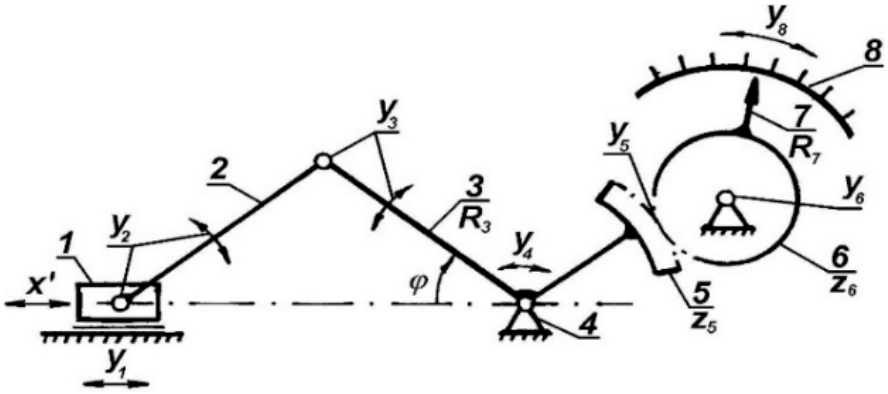


Рис.5.9. Принципова кінематична схема манометра

Очевидно, що $x' = R_{mp}\psi$. Тоді, з урахуванням (рис. 5.7), буде:

$$x' = \lambda\, R_{\text{тр}}\,(p–p_0), \qquad (5.38)$$

де $\lambda = 1/C$, а $R_{\text{тр}}$ – радіус кривизни трубчатої пружини.

Повзун *1 у* сукупності з шатуном *2* та кривошипом *3* утворює кривошипно-повзунковий механізм. Вільний кінець кривошипа виконує функції зубчатого сектора *5*, який утворює кінематичну пару з трибком *6*. На вісь останньої насаджена стрілка *7*, що переміщується по колу вздовж шкали *8*.

Отже, для встановлення загального вигляду *ФПС* манометра необхідне знання функції перетворення руху кривошипно-шатунної передачі, кінематична схема якої зображена на рис. 5.10. Функцію перетворення руху ми запозичимо без доведення з теорії механізмів. Записуємо:

$$x = 2(R_3 + R_3^2/R_2)\sin^2(\varphi/2). \quad (5.39)$$

Водночас можна показати, що швидкість руху повзуна пов’язана з лінійною швидкістю кінця кривошипа (точка В) так (рис.5.10):

$$V_A = V_B(R_3\sin 2\varphi/2R_2 + \sin\varphi). \quad (5.40)$$

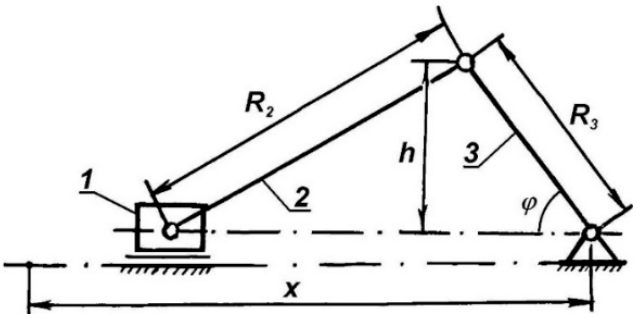


Рис. 5.10. Кінематична схема кривошипно-шатунної передачі

Передавальне відношення кривошипно-шатунного механізму − це відношення лінійної швидкості повзуна до лінійної швидкості кінця кривошипа.

Отже:

$$i_{КШ} = V_A / V_B = (R_3\sin 2\varphi/2R_2 + \sin\varphi). \quad (5.41)$$

Графічна форма залежності $i_{КШ} = f(\varphi)$ подається на рис. 5.11. З її ходу випливає, що в околі кутів 60^0 значення цієї величини близьке до одиниці.

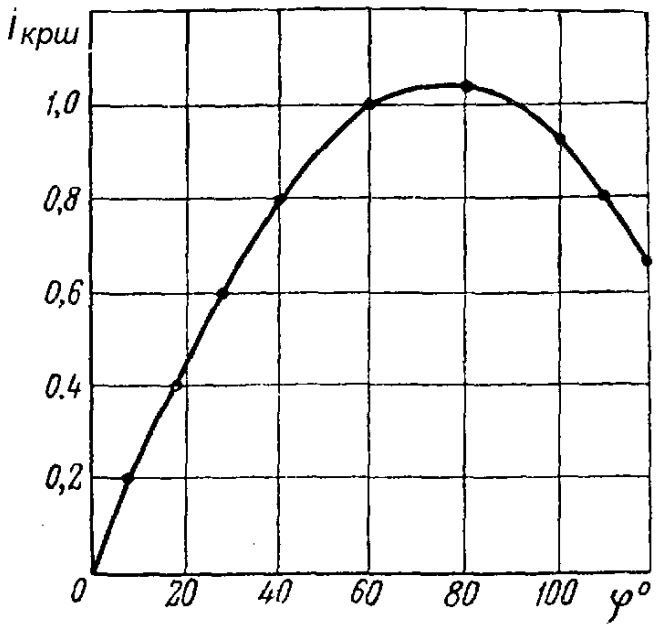


Рис. 5.11. Передавальне відношення кривошипно-шатунної передачі

Отже, якщо конструктивно забезпечити зміну кута φ в околі 60^0, то передавальне відношення кривошипа мало відрізнятиметься від одиниці, тобто $i_{кш} \approx 1$. Це

означає, що масштабні перетворення при русі кривошипно-шатунної частини механізму манометра не спостерігатимуться; роль цієї групи ланок зводиться до перетворення квазіпоступального руху кінця трубчатого чутливого елемента в обертовий рух. Якщо уважно розглянути рис. 5.8, то бачимо, що вільний кінець зубчатого сектора 3, який виконує функцію кривошипа за рис. 5.9, має специфічну дугоподібну форму, яка і забезпечує значення кута φ в околі 60^0.

При використанні методу передаточних функцій загальна функція перетворення руху *i* визначається як добуток передаточних відношень послідовно сполучених ланок механізму.

Отже,

$$i = i_1 \times i_2 \times i_3. \qquad (5.42)$$

Тут: $i_1=(R_3\sin 2\varphi/2R_2 + \sin \varphi)$ – передавальне відношення кривошипно-шатунної передачі, $i_2=R_5/R_3$ – передавальне відношення важеля, утвореного кривошипом 3 з довжиною R_3 і радіусом R_5 начального кола зубчатого сектора 5, $i_3=R_7/R_6$ – передавальне число важеля, утворене відношенням плеча стрілки R_7 до радіуса R_6 начального кола трибки 6.

Використання методу передавальних функцій для встановлення *ФПС* допустиме лише у випадку постійності значень i_k при довільному положенні ланок механізму в межах циклу руху. Знову звертаючись до рис. 5.11, бачимо, що ця умова може виконуватися наближено лише в тому випадку, якщо конструктивно забезпечити конфігурацію ланок, при якій у межах робочого циклу значення кутів φ забезпечує передавальне відношення i_1, що близьке до одиниці. Значення i_2, i_3 для даного механізму − постійні.

За методом передавальних функцій перетворення сигналу механізмом трубчатого манометра буде:

$$Y = i\,x' = i_1 \times i_2 \times i_3 \times x'. \qquad (5.43)$$

Враховуючи, що $i_2 = R_5 / R_3$, $i_3=R_7 / R_6$ та значення x', за формулою (А2) матимемо:

$$Y = i_1\, \lambda R_{\text{тр}}(R_5R_7/R_3R_6\,)(p–p_0). \qquad (5.44)$$

Запишнимо це співвідношення залежно від кількості зубців колеса зубчатого сектора 5 та зубчатого колеса 6, враховуючи, що $R_5 / R_6 = z_5 / z_6$. Тоді:

$$Y = i_1\, \lambda\, R_{\text{тр}}\,(R_7z_5/R_3z_6\,)(p–p_0). \qquad (5.45)$$

z_5 –кількість зубців колеса, з якого виготовлений сектор 5, а z_6 – кількість зубців трибки 6.

Формула (5.45) і є функція перетворення сигналу трубчатим манометром тиску.

Похибки роботи механізму манометра. Для встановлення структури похибок проведемо частинне диференціювання співвідношення (5.45) за формулою Тейлора. Нагадаємо, що якщо функція задана багатьма змінними, тобто

$Y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, то формула Тейлора записується так:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i.$$

Для *ФПС* манометра змінними координатами виступають усі складники формули (5.45), за винятком параметрів (z_5, z_6). Знайдемо загальну похибку роботи манометра. Проведемо частинне диференціювання (5.45). Буде:

$$\Delta Y = \frac{\partial f}{\partial i_1} \Delta i_1 + \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial f}{\partial R_{TP}} \Delta R_{TP} + \frac{\partial f}{\partial R_7} \Delta R_7 + \frac{\partial f}{\partial R_3} \Delta R_3 + \frac{\partial f}{\partial (p - p_0)} \Delta (p - p_0). \qquad (5.56)$$

Теоретична **(**схемна) похибка $\Delta y_{\Delta f} = \frac{\partial f}{\partial i_1} \Delta i_1$. При встановленні функції перетворення сигналу приймаються такі припущення: *1)* заміна дугового руху трубчатої пружини рухом по прямій траєкторії; *2)* передавальне відношення кривошипно-шатунного механізму $i_1 \approx 1$. Здійснити числову оцінку похибки за другим припущеннями не складає особливих проблем. Нехай зміна кута φ знаходиться у межах від 60 до 90 градусів. Звертаючись до рис. 5.11 знаходимо, що відхилення передаточного відношення від одиниці не перевищує 0,02, тобто $\Delta i_1 \approx 2\ \%$.

Похибки експлуатації $\Delta y_{\Delta t} = \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Delta \lambda$. До цієї групи відносимо зміну пружності матеріалу пружини $\Delta\lambda$ впродовж часу експлуатації як наслідок його зморення, так і вплив температурних змін на пружність. Мінімізацію впливу $\Delta y_{\Delta t}$ можна здійснити конструктивно введенням в механізм відповідно регулятора нуля та температурного компенсатора.

Технологічні похибки $\Delta y_{\Delta q} = \frac{\partial f}{\partial R_{TP}} \Delta R_{TP} + \frac{\partial f}{\partial R_7} \Delta R_7 + \frac{\partial f}{\partial R_3} \Delta R_3$. Це похибки неточності виготовлення розмірів q окремих деталей механізму. Точність виготовлення залежить від класу точності приладу, який указується у технічній документації на прилад (паспорті).

Похибки зчитування сигналу $\Delta y_{\Delta x} = \frac{\partial f}{\partial p} \Delta p$. Під вхідною координатою x розуміємо тиск у системі p, який підлягає вимірюванню. Тиск, який розвивається у трубці манометра, буде дещо відрізнятися від тиску у системі внаслідок обмеженості отвору у приєднувальному штуцері.

6. Технічна естетика, ергономіка та інженерна психологія [1, 5, 50 – 61]

6.1. Технічна естетика: становлення та зміст

6.1.1. Суть та зміст

На зорі технічного прогресу головним у виробництві та експлуатації техніки був матеріальний ефект. Але на деякому етапі розвитку виробничих сил людство зрозуміло, що основною цінністю у системі «людина – техніка» (СЛТ) є людина. Виникла галузь досліджень і технічної творчості, яка на початку отримала назву «дизайн», запозичену з англійського *desing*. Однак цей термін переважно застосовують для процедур, що стосуються загального проєктування і конструювання виробів [50–56]. У подальшому, при уточненні змісту діяльності, спеціалісти дійшли згоди щодо доцільності використання поняття «*технічна естетика*», зміст якої включає:

- художньо-конструкторський розв'язок (ХКР) виробу;
- художньо-естетичне оформлення, ергономіка робочих зон виробництва;
- ландшафтний дизайн території та архітектура виробничих споруд.

Сукупний результат вищенаведеного інколи називають *«технічний дизайн»*.

Отже, завдання технічної естетики – вдосконалення виробничого середовища та його безпеки, забезпечення зв'язку поміж елементами системи **«людина – машина – комплекс обладнання – приміщення – середовище».**

Причому цю задачу потрібно розуміти не як просте оформлення виробничих приміщень, а як створення гарної виробничої обстановки з технологічним обладнанням, що відповідає високим естетичним вимогам.

Технічна естетика приладу, верстата, автомобіля – це такий стан названого, який приваблює людину своїми формами, кольоровою палітрою, викликає задоволення при роботі з ними [56].

Терміни «виробнича» і «промислова» естетика – синоніми. Їх необхідно розглядати як комплекс практичних заходів естетичної організації виробничого середовища, в тому числі робочих місць та зон релаксації.

6.1.2. Зародження технічної естетики

Ідеї технічної естетики почали зароджуватися в середині XIX ст., задовго до появи практичного дизайну. Англійський соціолог, теоретик мистецтва Д. Рьоскін в лекціях, прочитаних в 1857 р. в Манчестері, поставив питання про естетичну цінність продуктів виробництва і наголосив[1]:

«*те, що створюється поспіхом, гине також поспіхом; те, що вартує дешевше за все, в підсумку виявляється найдорожчим».*

[1] *Рёскин Д. Радость на века и ее рыночная цена, или Политическая экономия искусства. - Соч. М., 1902, серия 1, кн. 8.*

Рьоскін наголошував на мистецтво побутових речей, вважаючи його основоположним в ієрархії мистецтв. На його думку, машинне виробництво калічить не тільки виготовлені речі, але і їх виробників і споживачів. Рьоскін запропонував свого роду ретроспективну утопію, яка закликає повернутися від машинного виробництва до ремеслового[1].

Думки Рьоскіна знайшли своє продовження в теорії і практичній діяльності другого англійського дослідника – У. Морріса. Він вважав, що має здійснитися перехід від машинного виробництва до нової ручної праці, адже дешеве промислове виробництво продукує товари, які не варто виробляти. Морріс спробував втілити свої ідеї в артілях ручного мануфактурного виробництва.

Конкретну розробку ідеї технічної естетики вперше розпочав Г. Земпер, який випустив в 1860 – 1863 рр. двотомну працю "Стиль в технічних і тектонічних мистецтвах, або Практична естетика". За Земпером[2], форма речі визначається: 1) її функцією, 2) матеріалом виготовлення, 3) технологією виробництва, 4) соціально-ідеологічним фактором, зумовленим конкретним суспільством.

Один із родоначальників теорії механізмів і машин, німецький інженер і теоретик Ф. Рело, виступив проти різкого розмежування мистецтва і техніки. У книзі "Про стиль в машинобудуванні" (1862 р.) він висунув ідею впровадження архітектурних стилістичних форм у машинобудуванні.

На рубежі XIX і XX ст., працюючи в Бельгії та Німеччині, архітектор Х. Ван де Велде наголосив на необхідності поєднання технічної та художньої форм виробу, підпорядкування цієї форми доцільності, логіці "практичної і розумної краси". Вслід за ним соціолог і теоретик художньої культури Г. Мутезіус висловлюється за "охудожнення" технічних виробів.

В 1907 р. художній директор концерна АЕГ П. Беренс висунув ідею художньої стандартизації та стилістичного клішування продукції. Його учень, архітектор В. Гропіус, підкреслював (1913 р.), що річ, чудова в технічному плані має бути пронизана духовною ідеєю й естетично оформлена.

Основи системної підготовки дизайнерів були закладені в 20-х роках минулого століття в Німеччині, ***м.*** *Веймар* (1919 – 1933 рр.), де була заснована *Вища школа будівництва та дизайну* під назвою ***«Баухауз».***

Ця школа стала одним із центрів технічної естетики (не тільки у Німеччині, але й в усьомі світі), яка прагнула подолати розрив між технікою та мистецтвом. Основні соціальні принципи технічної естетики вдало сформульовані одним із засновників «Баухауза», угорським художником Л. Моголі-Надь:

«дизайнер має справу з предметами, але його мета – це не предмет, а людина».

Розробляючи теоретичні основи дизайну, технічна естетика спрямовує зусилля людей на гуманізацію техніки, на олюднення "другої природи", на гармонізацію світу, насиченого машинами.

---

[2] *Земпер Г. Практическая эстетика. М., 1970.*

Роль технічної естетики в господарському житті держав виявилася настільки великою, що в 1957 р. була створена спеціальна організація – *Міжнародна рада організацій з художнього конструювання* (англ. «International Council of Society Industrial Design»; надалі ICSID), яка об'єднала понад 50 організацій художників-конструкторів різних країн, що свідчить про масштаби цього об'єднання та його значимість.

Робочою групою, за термінологією ICSID, сформульовані сфери діяльності, завдання, методи діяльності художника-конструктора: «Задача художника-конструктора полягає у визначенні форми предметів і послуг, які роблять життя людини плодотворним і задовольняють його потребам. Предмет роботи – розробка початкової ідеї майбутнього виробу, співпраця з іншими фахівцями при роботі над практичним варіантом цієї ідеї, визначення остаточної форми виробу та її втілення в життя».

В*исока мета технічної естетики* – це поліпшення соціальних умов і естетичного вдосконалення суспільства. *Теоретична мета* – отримання або нового продукту, або ж нових властивостей початкового продукту з урахуванням його користі та краси. *Практична мета* – розробка нової функціональної структури цього продукту; гармонійне й виразно стилістичне оформлення предмета.

Про це чітко зазначено у професійному кодексі дизайнерів, який був прийнятий в 1967 р. в Монреалі на V конгресі Міжнародної ради організації промислового дизайну.

6.1.3. Стан розвитку

Найбільш розвинене художнє конструювання в **США.** Система художньо-конструкторської освіти в США почала складатися більше 100 років тому, коли Європа ще «не прокинулася» в цьому відношенні. Тут більшість шкіл існує при великих фірмах або формується навколо великих дизайнерів. У США наявні три організаційних форми художньо-конструкторської діяльності: постійні художньо-конструкторські бюро при великих фірмах («Форд», «Дженерал моторс», «Дженерал-електрик» та ін.), тимчасова робота художників-конструкторів у дрібних фірмах, два-три художники-конструктори працюють у штаті фірми. Більше 30 дизайнерських фірм США обслуговують замовлення з 20-ти країн; 20 фірм мають філії в Англії, Франції, ФРГ, Італії та Канаді. З 1964 р. існує професіональне об'єднання художників-конструкторів; окрім цього об'єднання, функціонує Рада художників-конструкторів із пакування, Американський інститут художників-конструкторів з інтер'єру, національне товариство художників-конструкторів. Діяльність художників-конструкторів, що входять до цих об'єднань або фірм, спрямована на створення товарного виробу, що випускається, їх реклами, пакування та інше. Практика показала, що вироби, виготовлені з урахуванням естетичних вимог, мають гарний збут і забезпечують значну економію у виробництві.

«Потворне погано продається» – так була сформульована ціль художнього конструювання американським дизайнером Раймондом Луї.

Європа. У Вищій школі будівництва та дизайну **«Баухауз»** вперше був створений курс, побудований на вільній основі і разом з цим ретельно спрямований на розвиток у студентів творчих, аналітичних та індивідуальних начал. «Баухауз» у цей час став великим експериментальним центром як з розробки методів художнього конструювання, так і з підготовки художників для роботи в промисловості.

Досвід веймарського Баухауза дав дуже багато для розвитку дизайну і до цих пір являє собою цінний матеріал для досліджень. Тут існували два гармонуючих напрямки: художній і науковий. У 1919 р. в першій програмі Баухауза оголошено злиття образотворчих мистецтв і ремесл, заперечувалось безплідне салонне мистецтво. Мистецтво розглядалося як вищий ступінь ремесла. Програма навчання студентів складалася із загального курсу художнього конструювання, розрахованого на 6 місяців, і навчання на одному з відділень протягом 3-х років. Баухауз випускав спеціалістів із кам'яної скульптури, дереву, металу, кераміці, живопису на склі, настінному живопису, малюнку на тканинах. Для особливо талановитих студентів передбачався курс розвитку таланту.

Технічна підготовка включала роботу в майстернях, вивчення інструментів, станків, технологій, економічних розрахунків, бухгалтерського обліку, права. Художня підготовка передбачала вивчення курсу нарисної геометрії та технічного рисунку, пластичності форми та ліплення, композиції. Свої здібності студенти розвивали та вдосконалювали при виконанні замовлень промисловості.

Політичні потрясіння напередодні Другої світової війни в Німеччині вплинули на долю Баухауза. Зростаюча його популярність серед прогресивно настроєної частини німців викликала незадоволення наявної реакційної влади. Баухауз вважався організацією лівих соціалістів. У 1925 р. школа переведена в Дессау. Тут почався новий, найбільш плодотворний період в діяльності Баухауза, що характеризується найбільшою кількістю контактів з промисловістю. Багато замовлень великих промислових фірм (в тому числі авіаційних) і фірм, що випускають предмети побуту (мебель, шпалери, посуд і т. д.), виконувалися за участю художників-конструкторів Баухауза. У часі існування Баухауза пост директора займали видатні та відомі спеціалісти: до 1925 р. Гропіус, яким і був організований Баухауз; його замінив і керував школою до 1930 р. Ганес Майер. Після відставки Майера до закриття Баухауза його очолював Ван дер Рое.

Ідеї Баухауза поширювалися в світі складними шляхами. В основному їх «рознесли» його співробітники, більшість з яких (Гропіус, Брейер, Махолі Надь та ін.) перед II-ою світовою війною емігрували в США і значно сприяли розвитку дизайну в Америці.

У більшості передових індустріальних країн, зазначених нижче, були створені державні установи та керівні служби в галузі технічного дизайну.

В Англії, в грудні 1944 р. була створена Британська рада з технічної естетики для надання допомоги англійській промисловості у створенні високоякісної продукції, здатної конкурувати на зовнішньому ринку з

кращими зарубіжними виробами. Невдовзі була відкрита філія Ради в Шотландії. Рада пропагує ідеї художнього конструювання серед конструкторів, художників, промисловців, торговців і споживачів, які поширюються у школах, вузах, через журнал «Дизайн» та з допомогою виставок. Особлива увага Ради спрямована на професійну підготовку художників-уконструкторів. Основним навчальним закладом є Королівський коледж мистецтв з художньо-конструкторським відділенням. Цей заклад щорічно випускає чудових фахівців з технічного дизайну та добре підготовлених художників-конструкторів.

З 1958 р. експоновані вироби заносяться в спеціальну ілюстровану картотеку кращих зразків з присвоєнням спеціальних ярликів «Індекс дизайну». У картотеці налічуються десятки тисяч кращих зразків, виготовлених з участю художників-конструкторів. Двадцять кращих виробів англійської промисловості щороку відбираються спеціальними жюрі Ради та премійюються; авторам кращих робіт присуджується премія Герцога Единбурського «За елегантність конструкцій». Англійські художники-конструктори раз в п'ять років проводять Конгреси з художнього конструювання, в яких беруть участь керівні діячі як провідних фірм та компаній, так і повноважні представники державних структур.

Великих успіхів досягнуло художнє конструювання в **Японії.** Значний прогрес спостерігається за останні півстоліття. Основою цьому послужило створення науково-дослідного інституту промислового мистецтва, який дотепер є провідним в області технічної естетики. Японія займає провідні місця у світі з будівництва водних суден, випуску автомобілів, виробництва смартфонів (фотоапаратів), радіоприймачів і телевізорів, штучного волокна, виробництва сталі і цементу, також з генерації електроенергії.

На розвиток дизайну в Японії вплинули дизайнерські школи Європи та Америки, багато дизайнерів стажувалися в США, Англії, Італії, ФРГ. Художня творчість Японії минулих століть відзначалась своєю гуманністю, близькістю до природи, виявилася співзвучною ідеям сучасного дизайну і значно вплинула на художнє конструювання. Особливо яскраво це проявилося в сучасному японському інтер'єрі установ і житла, в конструюванні предметів побуту. Однак між промисловим дизайном і етнографічним мистецтвом, як в цьому переконалися на практиці, зв'язку майже немає. У промисловому дизайні застосування етнографічного мистецтва призводить до прикрашувальності, що іноді знижує функціональну значимість виробу.

Стартом «скачка» у Японії стала радіопромисловість; саме тут японські дизайнери зуміли проявити себе. Ця продукція виробляється з орієнтацією на зарубіжний ринок. Вивчаючи успіхи світового дизайну, японські художники-конструктори по-новому естетично осмислювали форми та функції (основні та побічні) приладів, які приводили до вироблення своїх методів художнього конструювання. Електроніка була новою галуззю виробництва, яка невдовзі стала найбільш масовою ареною дизайну.

В Японії підготовка художників-конструкторів ведеться в 32 вищих художньо-промислових школах, 14 університетах, значна кількість дизайнерів отримала освіту в Ульме (Німеччина), США та Англії. В Токійському університеті образотворчих мистецтв і в університеті Тиба систематично готують художників-конструкторів на університетському рівні. Організація зовнішньої торгівлі, створена в 1951 р., має в Токіо і Осаці «Дім дизайну» (за зразком «Дизайн Центр» в Англії), де проводяться виставки продукції з регулярною зміною експонатів, що сприяє вихованню естетичних смаків населення і пропаганді сучасних виробів високої якості.

У **Німеччині** кадри художників-конструкторів з 1953 р. готує Ульмська Вища школа художнього конструювання. Вихідним принципом навчання є збір фактичного матеріалу та його дослідження. Художня освіта поєднується з науковою, технічною і технологічною. Дипломні роботи студентів складаються з двох частин: науково-теоретичний і власний проєкт за спеціальністю. Ульмская школа має проєктно-конструкторські інститути, в яких розробляються реальні проєкти для зовнішніх фірм. Ідеї Ульма в той час визначили загальні тенденції західнонімецького напрямку в побутовій радіо- телевізійній апаратурі, медичному обладнанні, електронній техніці, побутових машин. Однак фірми не замикаються в рамках національних прийомів проектування, а з натхненням переймаються міжнародним досвідом проектування виробів, чуттєво слідкують за змінною кон'юктурою смаків споживачів. На світовому ринку Німеччини в даний час поступаються лише США.

В **Італії х**удожнім конструюванням продукції деякі італійські фірми почали займатися ще з 30-х років. Прикладом такого підприємства є фірма «Оліветті»; в цей час ця фірма досягла значних успіхів. Для роботи дизайнерів створені ідеальні та унікальні умови; зв'язуючою ланкою між дизайнерами і технічними працівниками виступає інформаційний центр фірми. Фірма високо цінує працю дизайнерів, штат яких ретельно підбирається. Провідні дизайнери працюють на правах консультантів. Фірма «Оліветті» – перша фірма, що отримала премію «Золотий обіг». Дизайнерів готують у Венеціанській школі мистецтв і в Міланському політехнічному університеті.

У Франції справа художнього конструювання не координується в державному масштабі; цей фактор, вірогідно, і є причиною відставання рівня розвитку художнього проектування від рівня названих вище країн. Донедавна французька промисловість була орієнтована головним чином на задоволення споживачів внутрішнього ринку, спостерігалася обмеженість експорту товарів, що в свою чергу знижує вимоги до їх конкурентної спроможності. Разом з цим, щодо французьких інженерів-конструкторів ствердилась думка, що вони від природи володіють тонким смаком і здатні успішно вирішувати технічні завдання. Дійсно, у Франції є багато талановитих конструкторів, які отримали загальне визнання та преміювалися, мають великі досягнення в верстатобудуванні, в автомобілебудуванні, у виробництві побутових приладів.

6.2. Ергономіка та інженерна психологія

[1, 5, 57 – 60]

Преамбула. Ергономіка – це науково-прикладна дисципліна, яка вивчає трудові процеси з метою створення оптимальних умов праці, що сприяє зростанню її продуктивності з одного боку, а з іншого – зберігає сили, здоров'я, працездатність людини і забезпечує необхідні зручності в ході виконання дій з технічною системою. Прикладна частина ергономіки – це створенням ефективних технічних систем, керованих людиною, відповідно до її психічних та фізіологічних можливостей. Основний зміст ергономіки – *питання сумісності технічного засобу і людини.*

Як наука ергономіка зародилась на рубежі XIX-XX століть, тоді як інженерна психологія дещо пізніше. З цієї причини інженерна психологія вважалася складовою ергономіки. Але коло питань, які розглядає сучасна інженерна психологія, не належить до класичних задач ергономіки.

Найбільш значимі роботи з інженерної психології з'явилися у США та Англії у 40-х роках минулого століття та пов'язані з удосконаленням об'єктів військової техніки, зокрема систем бойової авіації та керованого озброєння.

Серед авторів того періоду відзначений відомий психолог у галузі людського фактору в техніці – А. Чапаніс.

6.2.1. Суть та зміст дисциплін

Ергономічно орієнтовані технічні системи (синонім *«ергатичні системи»*) направлені на забезпечення оптимальних умов праці, що сприяє зростанню її продуктивності та якості виконання дій з одного боку, а з іншого – зберігає сили, здоров'я і працездатність людини (або системи людина-техніка) та забезпечує необхідні зручності в ході праці.

Сучасна система «людина-техніка-довкілля» (СЛТД) характеризується двома розрізненими ознаками.

По-перше, у такій системі людина контролює стан керованого об'єкта та впливає на нього не шляхом безпосереднього контакту зі знаряддям та предметом праці, а через дистанційні передачі. По-друге, людина сприймає інформацію про об'єкт керування та фактори середовища впливу від засобів відображення інформації (сенсорів), а вплив на об'єкт керування здійснюється за допомогою органів керування. Тут і знаходяться витоки як інженерної психології, так і ергономіки.

Відмінності між інженерною психологією та ергономікою такі. Це міждисциплінарні науки, використовують дані широкого класу наук, пов'язаних з людиною. Критерієм відмінності між інженерною психологією та ергономікою вважають їхню орієнтацію: або на психіку людини в процесі діяльності – *інженерна психологія*, або ж на врахування фізіологічних можливостей людини при проєктуванні техніки – *ергономіка*.

Інженерна психологія – психологічна дисципліна (теоретична), а ергономіка – інженерна (практична).

У *завданнях* інженерної психології головне людина та її психічні чинники у техногенному середовищі, а у *завданнях ергономіки* – проєктування та створення нової техніки з урахуванням фізіологічних властивостей людини-оператора, які впливають на ефективність діяльності системи "людина–техніка" та на виконання функцій цієї системи відповідно до призначення.

Головні *сумісні цілі інженерної психології та ергономіки*: підвищення ефективності систем «*людина – техніка – довкілля*» (у різних варіантах «людино-технічного комплексу», «ергатичної системи» тощо), забезпечення безпечної праці, розвитку особистості та професіоналізму у процесі праці. Але в процесі розгляду виникає питання с*умісності людини та техніки*.

Зміст інженерної психології – вивчення реакцій людини (оператора) на технічну систему, які проявляються у зміні психофізичного стану та можливостей людини в процесі експлуатації цієї системи.

Як *психологічна наука* інженерна психологія вивчає зміну стану психіки, з'ясовуючи при цьому характер зміни фізіологічних можливостей, що в кінцевому рахунку виконує завдання пристосування техніки до людини з врахуванням умов праці. Одночасно з вивченням фізіологічних змін вивчаються процеси та структура інформаційної взаємодії людини та технічних систем, перетворення та зберігання інформації, психічного врегулювання при прийнятті рішень щодо процесів управління технікою.

Як *технічна наука* інженерна психологія вивчає інструменти реалізації (технічні засоби) інформаційного обміну у системі «людина – машина» та його впровадження у практику проектування названих систем.

Інженерна психологія будується на реакціях людини на зовнішні подразнення через системи сприйняття зовнішнього світу, серед яких перше місце займає зір. Саме тому важлива у загальному конструюванні розробка пристроїв сигналізації та інформації для систем сприйняття, які в подальшому об'єднуються у панелі керування та пульти керування технічною системою.

Незважаючи на схожість назв вітчизняної інженерної психології та американської **Human engineering**, це далеко не тотожні дисципліни.

Вітчизняна інженерна психологія внаслідок історичних причин увібрала в себе науково-практичний контекст та близька за змістом до методології тотального проєктування **Human Factors** [55].

Сьогодні спостерігається зростання спеціалізації окремих напрямів, які розвиваються в рамках ергономіки та інженерної психології, що зумовлює появу нових дисциплін. До прикладу, інтенсивно розвивається напрямок, що виник у процесі виконання завдань, пов'язаних із проєктуванням комп'ютерних інтерфейсів – юзабіліті (Usability Engineering). Це науково-прикладна дисципліна, що служить підвищенню ефективності, продуктивності та зручності використання інструментів діяльності.

6.2.2. Задачі і завдання [57 – 60]

Задачі ергономіки:

- вивчення рухів людини в процесі виробничої діяльності, продуктивності роботи та інтенсивності витрат енергії при конкретних видах робіт;
- в трудовому процесі виникають потреби в ергономічних дослідженнях з метою вдосконалення знарядь праці, умов їх використання та маніпуляційних процедур;
- вивчення чинників, які впливають на діяльність оператора, оцінку та формування оптимальних функціональних робочих станів;
- конструювання техніки та організація управління технологічним процесом відповідно до органів сприйняття людини та її моторики;
- антропометрія, ергометрія, сенсометрія;
- гігієна та охорона праці, наукова організація праці.

Окрім названого, *результати ергономічних досліджень* використовуються також для оптимізації та організації робочих зон у промисловому дизайні.

Зміст задач, покладених на інженерну психологію:

- дослідження психологічних закономірностей трудової діяльності людини в системах контролю та керування технікою, а також інформаційну взаємодію з технічними пристроями цих систем;
- підбір людей, які володіють необхідним рівнем психофізіологічних якостей для роботи з конкретною технікою, та їх професійна підготовка;
- вивчення психологічних чинників, які впливають діяльність оператора, оцінка та формування оптимальних робочих станів.

Результатом названих дій є вироблення вимог до рівня професійної придатності, враховуючи необхідність відбору, ступінь навченості, види та зміст тренувальних вправ та засобів підготовки.

Ергономіка реалізує *чотири напрямки* діяльності, що різняться з методичним та методологічним базисом:

- *науковий:* проведення комплексних міждисциплінарних досліджень та надання людино-машинним комплексам орієнтованих на людину властивостей;
- *системний:* інтеграція даних різних наук про людину та техніку з метою дослідження можливостей надання системі «*людина – техніка – довкілля*» властивостей, орієнтованих на людину;
- *практичний:* формування орієнтованих на людину властивостей технічних комплексів, які перебувають в експлуатації, як у новостворених, так і в модернізованих;
- *методичний:* узагальнення досвіду створення ергатичних[3] систем, стандартизація та уніфікація процесів обліку людського фактору.

Основні сумісні напрямки наукової діяльності інженерної психології та ергономіки:

[3] **Ергатичні системи** – технічні системи, сумісні з фізіологією та психікою людини.

– психологія індивідуальної та групової діяльності;
– дослідження закономірностей взаємодії людини з технічними системами та навколишнім середовищем;
– розробка принципів створення систем *«людина – техніка – середовище»* та алгоритмів діяльності операторів;
– перспективне планування питань розвитку людино-машинних систем та змісту праці операторів, що діють у них;
– розробка методів та засобів, що супроводжують процеси створення та експлуатації ефективних ергатичних систем;
– узагальнення досвіду створення та експлуатації людино-технічних систем, стандартизація ефективних рішень;
– пошук зв'язків між якістю праці та факторами, що її забезпечують.

Додаймо до перерахованих наукових напрямів практичні завдання:
– проведення комплексної ергономічної експертизи;
– проєктування довкілля;
– впровадження стандартів у практику проєктування та експлуатації систем «людина – техніка – середовище».

Сумісними завданнями інженерної психології та ергономіки є питання групової психології та професійної підготовки операторів.

6.2.3. Методи досліджень в інженерній психології та ергономіці

Інженерна психологія та ергономіка мають широкий асортимент методів, які розвинуті в психології та галузях знань, пов'язаних із вивченням людини: кібернетики, теорії інформації, фізіології та інше. До таких методів відносять *спостереження* та *експеримент.*

Метод *спостереження* полягає у реєстрації зовнішніх проявів діяльності людини у СЛТД, до яких належать міміка, мова, поза, результати праці та ін. Прямі спостереження доповнюються методами реєстрації: фото-, відеозйомка робочої пози, рухів, показань приладів, напрямків погляду, звуковий запис мовлення. Проводяться заміри фізіологічних показників: частоти пульсу та дихання, кров'яного тиску, електричної активності серця, м'язів, головного мозку, знімаються дані методами ядерного магнітного резонансу (ЯМР) тощо.

Спостереження доповнюються бесідами з операторами та їх анкетуванням.

Експеримент – вивчення психологічних особливостей діяльності оператора шляхом зміни умов, цілей чи способу виконання завдань. Розрізняють лабораторний та природний експерименти.

Лабораторний експеримент є одним з різновидів моделювання і полягає в тому, що оператору у лабораторних умовах ставиться завдання виконати певні дії психологічного змісту, близькі його діям у реальній діяльності. Недолік методу – неможливість усунути всі побічні впливи, що спотворюють реальні чинники діяльності. Розрізняють синтетичний та аналітичний лабораторні експерименти. При синтетичному експерименті намагаються точно відтворити всі діючі фактори, а при аналітичному – один або кілька найістотніших

чинників. Різновид аналітичного експерименту – використання тестів, стандартизованих процедур з оцінки ступеня виразності у оператора тієї чи іншої психологічної якості (групи якостей). *Природний експеримент* проводиться шляхом аналізу, реєстрації параметрів реальної діяльності та випробувань. Широко використовується поєднання природного експерименту з математичними моделями, реалізованими комп'ютерною технікою із запровадженням граничних та екстремальних умов діяльності.

6.3. Психофізіологічний базис операторської діяльності [33, 50, 52]
(рецептивні властивості людини)

Сприйняття людиною довільного об'єкта здійснюється органами чуття в таких пропорціях: зір – 78 %, слух – 13 %, дотик, нюх, смак – 9 %. У пам'яті людини залишається 40 % побаченого і 20 % почутого [2]**.**

6.3.1. Вступні положення

Зв'язок людини зі зовнішнім світом здійснюється за допомогою еволюційно надбаних «аналізаторних систем» – *рецептивних властивостей людини*, які діють завжди інтегровано, у постійному взаємозв'язку, реалізуючи функції сприйняття. Усі аналізатори функціонують не ізольовано один від одного, а складно пов'язані між собою, забезпечуючи єдність сприйняття навколишнього світу, стану організму, попереджаючи людину про настання життєве важливих ситуацій та станів. Порушення процесу синхронної взаємодії аналізаторних систем викликає зміни у нормальному функціонуванні психіки, її рефлекторних та регуляторних механізмів. Особливо виразно ці ефекти проявляються у професіях, пов'язаних із незвичайними сенсорними стимуляціями.

Рецептивні властивості людини поділяють на *зовнішні*: зоровий, слуховий, нюховий, смаковий, шкірний; *аналізатори внутрішніх органів*, що оцінюють стан м'язів та сухожилля, і *руховий аналізатор* – вестибулярний апарат.

Довільний аналізатор – це складна система регулювання, що складається з:

- рецептора (чутливий елемент, датчик фізичної величини);
- провідні нервові шляхи;
- центри обробки в корі великих півкуль головного мозку.

Основна функція рецептора – перетворення енергії чинного зовнішнього подразника різної фізичної природи в трансляційний нервовий процес у людському організмі; відбувається зміна природи носія інформації.

Так, подразником для рецепторів ока є електромагнітні хвилі відповідного діапазону, рецепторів вуха – звукові (акустичні хвилі), рецепторів смаку – хімічний склад наявних у роті діючих речовин тощо.

Діяльність рецепторів, їх властивості (чутливість, вибірковість та інше) володіють зворотним зв'язком, тобто змінюються в залежності від оцінки центральними органами мозку значимості для організму отриманої інформації. Якість та глибина зворотного зв'язку регулюється станом психіки, умовами сприйняття та умовами оточення. Ці фактори покладені в основу інженерної психології, основним завданням якої є розв'язок задач людино-

машинних інтерфейсів, які забезпечують зв'язок оператора з технічною системою.

6.3.2. Характеристика зорового аналізатора

6.3.2.1. Загальна інформація

Через зоровий аналізатор, очі, людина отримує основну інформацію про зовнішній світ, що дозволяє їй здійснювати усвідомлену цілеспрямовану діяльність. Попарна взаємодія очей супроводжується *бінокулярним ефектом*, завдяки якому виникає об'ємне сприйняття предметів, їх віддаленості в просторі. Чутливість ока забезпечується двома типами фоторецепторів – **паличками та колбочками,** з яких сформована **сітківка (ретина)** ока, розташованої на внутрішній частині опуклої поверхні так званого очного яблука (рис. 6.1) [18].

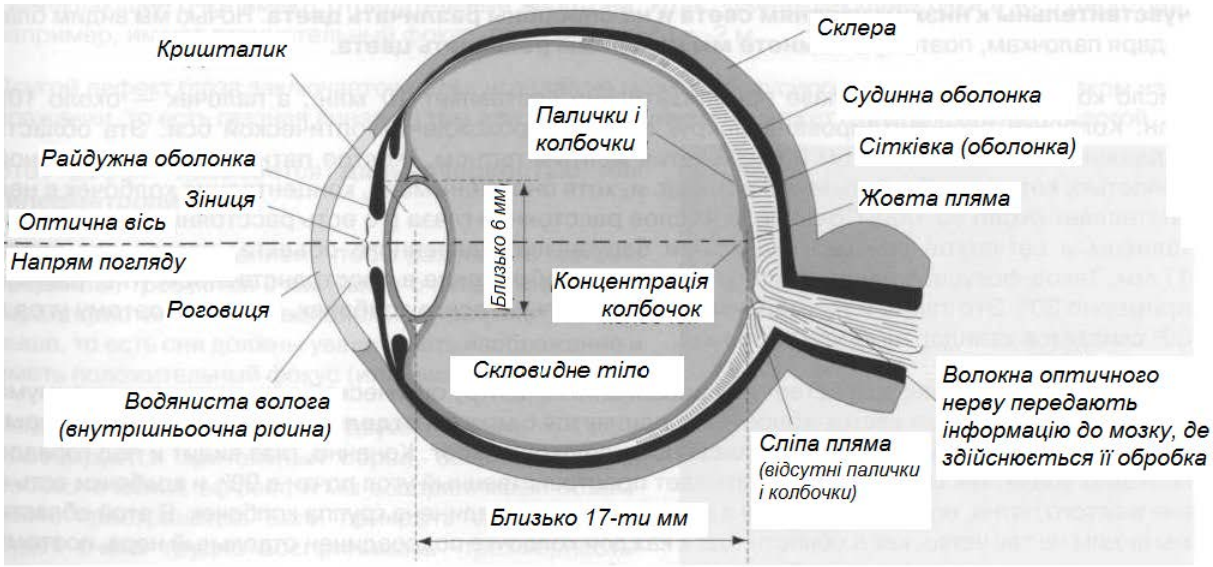


Рис. 6.1. Схема будови ока

При дії електромагнітного випромінювання відповідної частоти на фоточутливу поверхню сітківки ока у психіці людини виникають первинні зорові відчуття – світло, колір, образи зовнішнього світу, що забезпечує зорову діяльність людини. Зображення предметів зовнішнього світу, побудованого оптичною системою ока, головно кришталиком, надходить на сітківку; тут світлова енергія перетворюється в інші форми – електричну та хімічну. Фоторецептори пов'язані з волокнами зорового нерва, які передають інформацію до мозку. Всього в сітківці близько 120 млн паличок і біля 7 млн колбочок, а волокон від них відходить лише мільйон. Отже, окремі рецептори інтегровані у кластери (групи), які ще називають рецепторними полями. Інтегральна світлова чутливість *паличок* дуже велика, але вони *не володіють* кольоровою селективністю; світлова чутливість у колбочок значно менша, але саме завдяки *колбочкам* людині властиве *сприйняття кольору*.

Таким чином, палички являють собою фоторецептори *ахроматичного* (чорно-білого), а колбочки – *кольорового* зору.

6.3.2.2. Чутливість зору

Зорова система ока людини працює у дуже широкому діапазоні яскравості. Абсолютна чутливість зору дуже висока і становить 10-15 квантів променистої енергії. Мінімальне освітлення, що сприймається оком людини, складає приблизно 1 нанолюкс, а максимальна яскравість, що викликає засліплення, – 100 кілолюкс.

Отже, динамічний діапазон сприйняття інтенсивності світлового потоку, видимий оком, буде: $10^5/10^{-9} = 10^{14}$. Цей діапазон досягається в процесі *світлової* та *темнової* адаптації, час якої становить від 8 до 30 хвилин.

Темнова адаптація виникає при зменшенні яскравості фону від деякого значення до мінімальної яскравості (практично темноти). Відбувається низка змін і в зоровій системі, а саме:

- розширюються зіниці;
- збільшується площа на сітківці, за якою відбувається сумування впливу світла;
- збільшується час сумування світлових впливів;
- збільшується концентрація світлочутливих речовин у зорових рецепторах;
- збільшується чутливість зорової системи;
- спостерігається перехід від колбочкового до паличкового зору.

Світлова адаптація – явище, протилежне темновій; відбувається при пристосуванні зорової системи до світла після тривалого перебування у темряві.

6.3.2.3. Кольорове сприйняття

Око чутливе до електромагнітного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 380 нм до 760 нм, причому максимум світлової чутливості зміщується у короткохвильову область залежно від рівня освітленості. Цим пояснюється «ефект Пуркіньє»: при сутінковому освітленні сині та зелені предмети здаються світлішими, ніж червоні та жовті (*вночі всі кицьки сірі*).

Хвилі різної довжини викликають відчуття кольору та його градацій:

Червоний: 610 нм – 630 нм; *жовтий:* 565 нм – 590 нм; *зелений:* 550 нм; *синій:* 410 нм – 470 нм; *фіолетовий:* 380 нм – 400 нм.

Чутливість ока до розрізнення колірного тону різна, має близько 130 градацій. Насправді, ці особливості колірного зору використовуються при створенні систем кольору кодування та сигналізації. Зазвичай використовується не більше чотирьох кольорів – червоний, жовтий, зелений та білий. Найбільш тонко оком розрізняються довжини хвиль у районі 494 мкм (зелено-блакитний колір) та 590 мкм (оранжево-жовтий). У середній частині видимого спектра (зелений колір), а також на його краях (фіолетовий і червоний) диференціювання кольоровості значно грубіше. Максимальна колірна чутливість ока при денному освітленні лежить у жовто-зеленій частині спектра (555 нм, рис. 2.23).

Колір та світло відіграють значну роль у людській практиці. При створенні багатьох виробів необхідно враховувати їх колірні та світлові характеристики.

Колір може виконувати енергетичну та інформаційну функції. Кольором кодуються стани індикаторів технічних систем Наприклад, червоний колір свідчить про критичні та небезпечні режими, зелений – про нормальне функціонування системи, жовтий попереджає про зміну режиму. Світлофор є прикладом технічного пристрою, в якому колір відіграє суто інформаційну роль, регулюючи дорожній рух.

До прикладу, військові стандарти США встановлюють таку доповнену абетку колірного коду:

- червоний – використовується для попередження оператора про те, що система або її частина не працюють;
- миготливий червоний – для позначення ситуації, яка вимагає негайного реагування;
- жовтий колір – для позначення граничних режимів, у яких необхідна обережність;
- зелений колір – нормально працююча система;
- білий колір – використовується для позначення функцій, про які не відомо, правильні вони чи помилкові; наприклад, для позначення проміжних станів системи;
- синій колір – довідникові та консультативні відомості.

Найбільш контрастні співвідношення кольорів у порядку зменшення фізіологічної дії колірного контрасту:

синій на білому, *чорний* на жовтому, *зелений* на білому, *чорний* на білому, *зелений* на червоному, *червоний* на жовтому, *червоний* на білому, *помаранчевий* на чорному, *чорний* на фіолетовому, *помаранчевий* на білому, *червоний* на зеленому.

При організації складних пультів управління та індикацій, що містять велику кількість ознак кодування, виникають складні взаємодії білого світла й кольору, що вимагає спеціальних процедур вимірювання, підбору кольору. З цією метою використовуються спеціальні шкали, методи побудови ізотропного простору розрізнення білого світла та кольору. Доведено перевагу колірного кодування при виконанні завдань виявлення: час пошуку об'єктів за кольором мінімальний.

Зоровий комфорт та працездатність залежать від співвідношення між яскравістю об'єкта, що спостерігається, і яскравістю його навколишнього фону. Освітленість робочого місця впливає на працездатність оператора. Зниження освітленості веде до зниження працездатності.

6.3.2.4. Гострота зору, його інерційність

Гострота зору людини – мінімальний кут поля зору 2α, при якому дві рівновіддалені на ширину *L* лінії видно як роздільні при їх розгляді з відстані найкращого бачення *D*. Під роздільною здатністю ока розуміють обернену величину: R = 1/L; розмірність [ліній/мм]. Отже, якщо відстань L між лініями складає *0,07 мм,* відстань найкращого бачення D = 250 мм, то кут поля зору складає близько 1 кутової мінути (рис. 6.2).

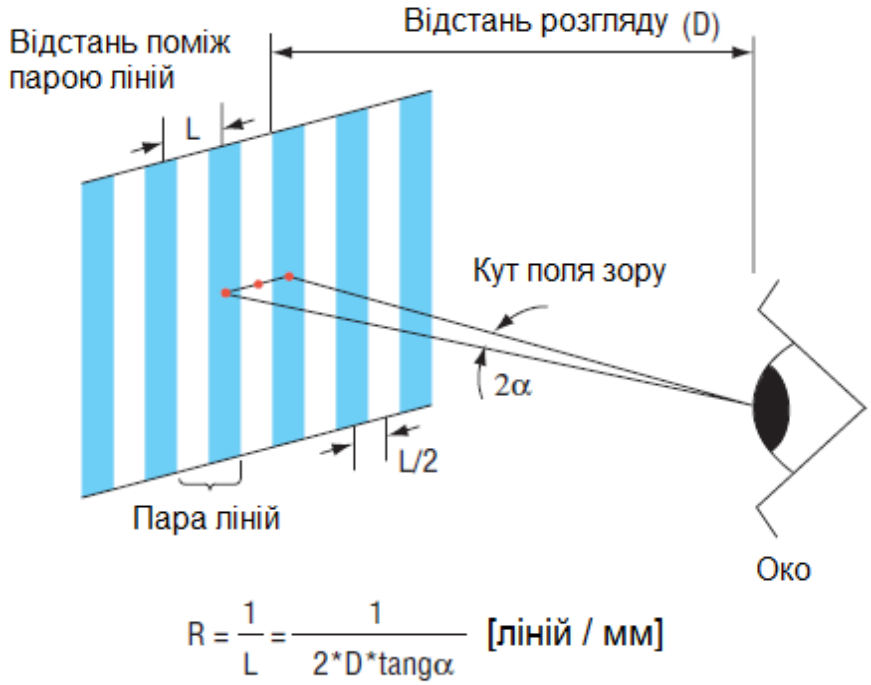


Рис. 6.2. Визначення роздільної здатності ока людини

Цей кут залежить від освітленості та контрасту об'єкта, його форми та положення в полі зору; відіграє значну роль у завданнях інформаційного пошуку та виявлення об’єктів, що займає значну частину часу операторської діяльності.

На сьогодні немає задовільної науково обґрунтованої теорії, що пояснює роботу зорової системи людини загалом; є лише низка припущень про принципи роботи окремих ланок системи. Однак її властивості цілком описані та оформлені у вигляді довідкових даних. Їх використання вимагає від проєктувальників великої обережності, оскільки параметри зорової системи дуже варіативні та сильно залежать від умов та методів вимірювання.

Інерційність. Зорова система людини має деяку інерційність при швидкій зміні світлових подразників, які після певного порога, так названого «критичною частотою злиття світлових миготінь» *(КЧЗМ)*, сприймаються як неперервний сигнал (закон Тальбота). *КЧСМ* змінюється в діапазоні від 14 до 70 Гц залежно від функціонального стану зорового аналізатора і параметрів сигналу.

На цьому ефекті працюють системи кіно та телебачення, що показують на короткий час зображення у вигляді змінної послідовності картинок (кадрів), створюючи в такий спосіб ілюзію руху. Динаміка неперервності руху пояснюється інерційністю зорових образів, що виникають безпосередньо після припинення подразнення сітківки. При цьому можливі накладання та спотворення сприйняття, що веде до помилкових дій людини.

Нижній абсолютний поріг сприйняття швидкості:

– за наявності в полі зору нерухомого орієнтиру 1 – 2 кут. мін/с;

– без орієнтиру 15 – 30 кут. мін/с.

Рівномірний рух із малими швидкостями (до 10 кут. мін/с) за відсутності у полі нерухомих орієнтирів може сприйматися як уривчасте.

6.3.2.5. Інформаційне поле зорового сприйняття

Робоче місце працівника, особливо оператора, визначає два поля: інформаційне поле – простір із засобами відображення інформації, і моторне поле – простір з органами управління та об'єктом праці.

Інформаційне поле. В інформаційному полі зорового спостереження (рис. 6.2) виділяють чотири зони.

У центрі поля *зона 1* (*рис. 6.2, а),* навколо лінії зору знаходиться вузький конус *високоточного зору*, що відповідає так званій «жовтій плямі», розмір якої у кутовій мірі складає близько 1 ° (див. рис. 6.1). Ця зона характеризується найкращою гостротою зору, під якою розуміють здатність ока бачити роздільно дві лінії на мінімальній відстані одна від одної (0,07 мм) та найбільш тонкі кольорові нюанси. Тут розміщують засоби відображення інформації, які вимагають особливо точного та швидкого зчитування.

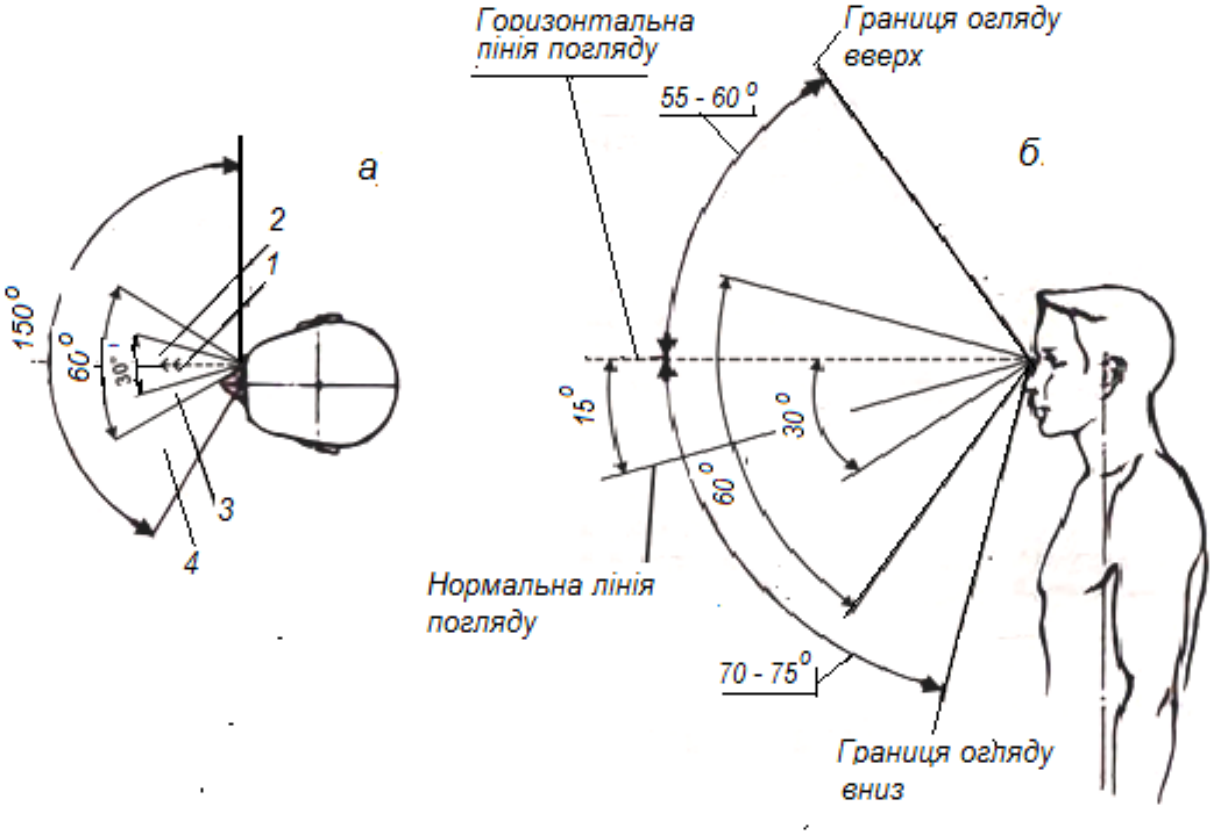


Рис. 6.2. Інформаційне поле зорового сприйняття:

а – горизонтальна площина: загальне поле зору по горизонталі 150 °, по напрямку до іншого ока 60 °; у зовнішньому напрямку 90 °;

б – вертикальна площина: загальне поле зору по горизонталі 130 град., поле зору кожного ока: нагору 55 ° - 60 °; вниз 70 ° - 75 °.

Зона точного зору (зона *2*) знаходиться всередині конуса з кутом приблизно 30 °. У цій зоні розташовують засоби інформації, які часто використовуються і вимагають менш точного й швидкого зчитування. Третя зона, *зона оточення*, розташована всередині конуса з кутом 60 °. На периферії цієї зони гострота зору падає до 1% від максимальної. Тут розміщують рідкісне вживані засоби

відображення інформації. Четверта зона – периферійна, розташована поза виділеною зоною *З* – деталі об’єкта не розрізняються.

6.3.3. Слуховий аналізатор

Слуховий аналізатор – другий за значимістю після зору канал отримання інформації. На його основі формується розмовний спосіб передачі та обміну інформації, що є основним (найефективнішій) методом людської комунікації. У процесі функціонування слухового аналізатора у свідомості людини формується відчуття звуку. Гучність звуку пов'язана з інтенсивністю звукового тиску (табл. 6.1).

Чутливість слухового аналізатора, як і зорового, близька до абсолютної (див. табл. 6.1) і дозволяє в умовах абсолютної тиші чути механічні коливання, викликані тертям молекул при броунівському русі.

Таблиця 6.1

Звукові тиски та рівні, що зустрічаються у життєвих ситуаціях

Звуковий тиск, *Па*	Рівень тиску, *дБ*	Джерело звуку
0.00002	0	Поріг чутності ти
0.000063	10	Шелестіння листя
0.0002	20	Студія звукозапису
0.002	40	Бібліотека
0.0063	50	Тихий конторський офіс
0.02	60	Звичайна розмова (на відстані 1 м)
0.063	70	Радіомовлення середньої гучності
0.1	74	Дорожній шум вдень
0.2	80	Типова фабрика
0.63	90	Потяг метро
2	100	Симфонічний оркестр
6.3	110	Рок-ансамбль
20	120	Взліт реактивного літака
200	140	Больовий поріг

Па - паскаль, одиниця вимірювання тиску в системі СІ
1 Па = 1Н/м ^{2}

Парна взаємодія вух реалізує «бінауральний ефект» – стереоефект, що дозволяє людині локалізувати у просторі точкове джерело звуку та виділяти напрямок його переміщення. Вплив звукових коливань на органи слуху викликає такі відчуття: *гучність, висоту (частоту), тембр* звуку.

У зв’язку з тим, що слухове сприйняття пропорційне логарифму кількості звукової енергії та має великий перепад звукового тиску в діапазоні чутності, для описання звукових процесів вибирають логарифмічну шкалу.

Для визначення рівня звукової інтенсивності L_J взято значення порогу звукової інтенсивності J_0, а при визначенні рівня звукового тиску L_p – поріг чутності p_0. Формули для визначення рівня звукової інтенсивності L_J та рівня звукового тиску L_p такі:

$$L_J = 10\lg(J/J_0), дБ. \qquad (6.1\ а)$$

$$L_p = 10\lg(p^2/p_0^2) = 20\lg(p/p_0)\, дБ. \qquad (6.1\ б)$$

де J, p – біжучі значення звукової інтенсивності та звукового тиску;

J_0, p_0 – значення інтенсивності та звукового тиску на нижньому порозі чутності людиною, частота 1000 Гц.

Чутність вуха до коливань різної частоти неоднакова і максимальна в діапазоні 200 – 4000 Гц (рис. 6.3).

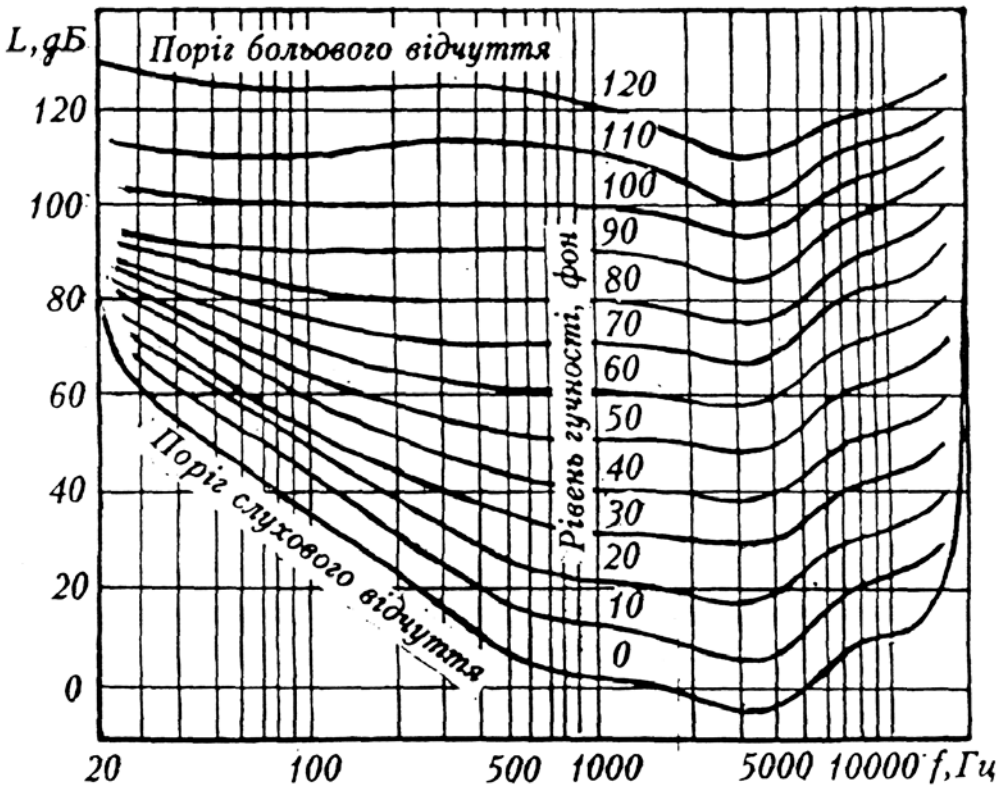


Рис. 6.3. Залежність рівнів звукового тиску від частоти, що сприймається людиною

Наведемо числові значення параметрів слухового аналізатора людини.

Мінімальна амплітуда коливання середовища, що викликає відчуття звуку, складає $0{,}9\cdot10^{-8}$ *см* .

Мінімальне значення звукового тиску – поріг чутності p_0, від $2\cdot10^{-5}$ *Па* ;

J_0 – значення інтенсивності звуку на нижньому порозі чутності людини, $J_0 = 10^{-12}\ Вт/м^2$.

Максимальне значення звукового тиску $p_б$ – поріг больового відчуття, приблизно 200 Па. Розрахунок рівня звукового тиску больового відчуття, відповідно до формули (6.6.1), $L_б = 140\,дБ$.

З віком слухова чутливість людини на високих частотах понижується на 20 і більше децибелів.

При надходженні до органів слуху звукових сигналів різної частоти настає *«ефект маскування»*, що виражається у заниженні чутності корисного сигналу. Найбільш значимий маскувальний вплив перешкоди виникає у таких випадках:

- якщо частоти корисного сигналу та перешкоди близькі між собою;
- у міру збільшення інтенсивності перешкоди маскування охоплює дедалі більші частоти сигналу;
- якщо частота перешкоди нижче за частоту сигналу;
- при інтерференції хвиль корисного сигналу та перешкоди.

Найсильніше людині дошкуляють ті звуки, які складаються не з однієї чи кількох дуже інтенсивних частот, а є складною сумішшю безлічі частот – *"білий шум"*. Подача послідовної серії звукових сигналів при зменшенні інтервалів між ними викликає ефект *«критичної частоти злиття звуку»* (КЧЗЗ), який настає при частоті звукових послідовностей близько 35 – 70 Гц і сильно залежить від умов сприйняття та психофізіологічного стану людини. Звучання людської мови лежить у діапазоні близько 300 – 4000 Гц, основний спектр – 1000 Гц; це частота тестування якості роботи звукової апаратури.

Розмовний сигнал має особливості. Насамперед акустична енергія голосних звуків концентрується в гармонійно пов'язаних діапазонах частот, які називаються *формантами*. Ці частоти відповідають механічним резонансам мовного тракту. Перша форманта розташовується між 200 і 800 Гц, друга – в околі 1500 Гц, третя – в області 2400 Гц, четверта – приблизно навколо частоти 3500 Гц. При генерації приголосних звуків у спектрі останніх більше енергії припадає на високі частоти, ніж на низькі. Вплив на органи слуху групи коливань (спектра) викликає відчуття «забарвлення звуку» – тембру, групи окремих звукових коливань в деякому відносно вузькому інтервалі частот у межах кривої чутності, що дозволяє людині ідентифікувати джерело звуку, а також розрізняти людей за голосом.

Спектр шуму – залежність рівнів інтенсивності від частоти. Розрізняють спектри суцільні – широкосмугові, у яких спектральні складові розташовані за шкалою частот неперервно, і дискретні – тональні, коли спектральні складові розділені ділянками нульової інтенсивності. На практиці спектральну характеристику шуму зазвичай визначають як сукупність рівнів звукового тиску (інтенсивності) у частотних октавних смугах. Ширина таких смуг відповідає співвідношенню $f_в / f_н = 2$, де $f_в$ – верхня частота смуги, $f_н$ – нижня частота смуги. Кожну смугу визначають за її середньогеометричною частотою

$f_{серед.} = \sqrt{f_B \, f_H}$. Оскільки сприйняття звуку людиною різняться за частотою (рис. 6.3), для вимірів шуму, що відповідає суб'єктивному сприйняттю, вводять поняття коректованого рівня звукового тиску. Корекція здійснюється за допомогою поправок, які додаються у частотних смугах. Стандартні значення корекції в частотних смугах наведені у таблиці 6.2. Значення загального рівня шуму з урахуванням вказаної корекції за частотними смугами називають *рівнем звуку* (*дБ*).

За часовими характеристиками шуми поділяють на постійні й непостійні.

Таблиця 6.2

Стандартні значення корекції рівнів звукового тиску у частотних смугах

Середньогеометричні частоти октавних смуг, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Корекція, дБ	-42	-26,3	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1,0	-1,1

Постійними вважають шуми, у яких рівень звуку протягом робочого дня змінюється не більше ніж на 5 дБ. *Непостійні шуми* поділяються на переривчасті (з коливанням у часі) та імпульсні. При переривчастому шумі рівень звуку може різко падати до фонового рівня, а довжина інтервалів, коли рівень залишається постійним і перевищує фоновий рівень, досягає 1 с та більше. *До імпульсних* відносять шуми у вигляді окремих звукових сигналів тривалістю менше 1 с кожний, що сприймаються людським вухом як окремі удари.

Розуміння розмовних повідомлень залежить від темпу їх передачі, наявності інтервалів між словами та фразами. Оптимальним вважається темп 120 слів за хвилину. Інтенсивність розмовних сигналів повинна перевищувати інтенсивність шумів не менше ніж на 6.5 *дБ*. Упізнання розмовних сигналів залежить від довжини слова. Багатоскладові слова правильно розпізнаються краще, ніж односкладові, що пояснюється наявністю в них більшої кількості розпізнавальних ознак. Точніше розпізнаються слова, що починаються з голосного звуку. На сприйняття слів вирішальний вплив мають їх синтаксичні та фонетичні закономірності. Встановлення синтаксичного зв'язку між словами у багатьох випадках дозволяє відновити пропущений сигнал. При переході до фраз оператор сприймає не розрізнені, окремі сигнали, а граматичні структури, що породжують смисловий зміст повідомлення.

6.3.4. Інші аналізатори та взаємодія аналізаторних систем [60]

Зорова та *слухова* аналізаторні системи (зовнішні аналізатори) є основними: це класичні об'єкти вивчення інженерної психології.

Однак людині властиві ще й інші системи для сприйняття зовнішнього світу: *вестибулярний, тактильний* (*шкірний), нюховий* та *смаковий.*

Вестибулярний аналізатор. Забезпечує координацію тіла при зміні положення голови (і тіла) у просторі та напрямки руху тіла. Особлива роль цього аналізатора проявляється при попаданні людини в незвичайні гравітаційні

умови, такі як невагомість, що перешкоджають його нормальній роботі. Важлива також вестибулярна функція і в умовах прискорень, особливо з різкою зміною напряму руху. Особливо виразно порушення процесу синхронної взаємодії аналізаторних систем проявляються у професіях, пов'язаних із незвичайними сенсорними стимуляціями. Так, широко відзначаються ефекти порушення просторової орієнтації у діяльності льотчиків, загойдування у моряків, порушення схеми тіла у космонавтів. У дослідженнях внутрішніх вестибулярних взаємодій у льотчиків відзначено вплив вестибулярного апарату на нормальну роботу рухової системи ока. У літературі широко описані феномени хвороби рухів – кінетозу, що виникає у нормальних здорових людей як реакція на незвичні форми руху.

Відзначимо важливу особливість дії сенсорних систем людини: властивості аналізаторних систем сильно залежать від оцінки мозком прийнятої інформації. Якщо вона оцінена як «значуща», то підвищується чутливість аналізаторів і, навпаки, знижується, якщо вона розшифровується людиною як непотрібна. Тому треба обережно ставитись до використання в практиці проєктування результатів лабораторних експериментів, одержаних в умовах невизначеного контексту.

Тактильний аналізатор. Це чутливість шкіри людини; в техніці головна чутливість подушечок кінцівок пальців (синонім – пучка, пучки), які забезпечують як точну установку ручок керування технічними системами, так і відчуття переміщень об’єктів. Разом з цим людині властиве відчуття температурних змін, насамперед порівняльних.

Нижній поріг тактильної чутливості кінцівок пальців, що визначається мінімальним тиском на шкіру пучок, складає біля 3×10^4 *Па* (3 *гс/мм*^{2}). Наявний також і верхній поріг, величина якого складає приблизно 3×10^6 *Па* (300 *гс/мм*^{2}).

Щодо переміщень, то експериментальні дослідження показали, що пучки пальців здатні відчути лінійні переміщення $l \approx 0{,}2\ldots0{,}3$ *мм*, а кутові – 0,5…1°. Ці величини є мірою точності установки візирів лінійних та кутових шкал.

Нюх. Людський ніс – орган, який служить не лише засобом дихання, але й відіграє вирішальну роль у нашому нюхові.

Нюхова сенсорна система – це система, що забезпечує сприйняття хімічних летких молекул і формування нюхових відчуттів. Один нюховий рецептор (Н. Р.) може збуджуватися навіть окремими молекулами запашної речовини за умови, що вони є леткими і розчинними у воді чи жирах.

Н. Р. знаходяться на кінцях вій, що виходять з нюхових клітин, які розташовані в слизовій оболонці верхньої частини носової порожнини, а також в епітелії дихальних шляхів. Відростки рецепторів формують нюховий нерв, що йде до нюхової зони кори великих півкуль, яка знаходиться на внутрішній поверхні скроневих часток. Тут відбувається розпізнавання запахів. Ці рецептори належать до класу родопсина як сімейство рецепторів, сполучених із G-білком (GPCR).

Нюхові рецептори утворюють мультигенні сім'ї, що складаються з більш ніж 900 генів у людини і 1500 генів у мишей.

Відділи нюхової сенсорної системи:

- периферичний відділ − перетворення хімічної інформації на нервові імпульси здійснюють нюховими хеморецепторами носової порожнини;
- провідниковий відділ − проведення імпульсів здійснюють нюхові нерви;
- центральний відділ − кіркове формування нюхових відчуттів відбувається у нюховій цибулині та нюховій зоні скроневої частки кори півкуль у тісній взаємодії з іншими зонами.

Гострота нюху характеризується **порогом відчуття**, тобто мінімальною кількістю пахучих речовин, які здатні викликати відчуття запаху. Її вимірюють кількістю молекул пахучої речовини в 1 см³ повітря.

Нюхова система швидко звикає до запаху: якщо людина заходить до кімнати з деяким запахом, то через певний час перестає його відчувати.

Смакові рецептори. Це сенсорні органи, які відіграють вирішальну роль у нашій здатності сприймати різні смаки та насолоджуватися ними.

Анатомія смакових рецепторів. Смакові рецепторні клітини розташовані на поверхні язика і згруповані в кластери, які називаються смаковими рецепторами. Це мікроскопічні структури, зібрані разом у сосочки, є крихітними горбиками на язиці та інших частинах рота у вигляді конусків, циліндриків та грибочків. Структура смакових рецепторів складається з спеціалізованих клітин, чутливих до різних смакових молекул. Коли ці клітини активуються присутністю певної смакової молекули, вони посилають сигнали в мозок, які інтерпретуються як смакові відчуття.

Опорні клітини оточують клітини смакових рецепторів і забезпечують структурну та метаболічну підтримку. Базальні клітини – це недиференційовані клітини, розташовані біля основи смакової бруньки; вони відповідають за поповнення клітин смакових рецепторів, які постійно замінюються.

Кожна смакова брунька містить від 50 до 100 смакових рецепторних клітин зі смаковою порою у верхній частині. Смакова пора — це отвір, через який молекули їжі та напоїв потрапляють до клітин смакових рецепторів. Коли молекули смаку зв’язуються з клітинами смакових рецепторів, відбувається низка хімічних реакцій, що призводить до активізації клітин смакових рецепторів і передачі сигналів у мозок.

Шість основних смаків

Є шість основних смаків, які визначаються смаковими рецепторами:

солодкий, кислий, солоний, гіркий, умамі і олеогут.

Кожен смак визначається різними смаковими рецепторами, які посилають сигнали в мозок для інтерпретації смаку.

Солодкий смак. Це найбільш елементарний смак, що приносить задоволення. Визначається рецепторами під назвою T1R2 і T1R3, які активуються цукрами та іншими солодкими сполуками.

Кислий смак. Раніше вважалося, що кислотний смак пов'язаний із розкладанням їжі, що продукт із цим смаком не придатний до їжі. Але ми знаємо, що цей смак у багатьох випадках корисний. Визначається рецепторами під назвою PKD2L1 і PKD1L3, які активуються кислотами.

Солоний смак. Мозок людини запрограмований насолоджуватися солоним смаком у мінімальній концентрації. Їжа з солоним смаком забезпечує організм сіллю, яка необхідна для метаболізму обмінних прцесів. Смак солі може викликати звикання, тобто організм може адаптуватись до солі, що шкідливо. Визначається рецепторами під назвою ENaC, які активуються іонами натрію.

Гіркий смак. Це сигнал тривоги. Гіркий смак асоціюється з нелюбов'ю до їжі. Деякі антиоксидантні речовини сприяють метаболізму і запобігають утворенню пухлин, містяться у продуктах рослинного походження та напоях, таких як кава. Визначається групою рецепторів, які називаються TAS2R, які активуються широким спектром сполук, включаючи токсини.

Смак Умамі. Визначається як інтенсивний та приємний аромат, який формується у в'яленому м'ясі та рибі, зрілих сирах, зеленому чаї, соєвому соусі та варених помідорах. Слово «Умамі» походить від японського терміна, що використовується для означення цих смачних продуктів. Визначається рецепторами під назвою T1R1 і T1R3, які активуються глутаматом амінокислоти.

Олеогут. Зовсім недавно смак жиру включений у смакові фактори як шостий, який можна виявити за смаковим відчуттям. Такі дослідження проведені в штаті Індіана (США) університетом Педью (Патерсон Нойберт, 2015). Цей новий аромат отримав назву **"Oleogustus"**.

На додаток до основних смаків, смакові рецептори також можуть виявляти інші смаки, такі як гострий і металічний смак. Рецептори цих смаків недостатньо вивчені, і механізми, за допомогою яких вони виявляються смаковими рецепторами, все ще вивчаються.

Рецептори у поєднанні, створюючи складні смаки, які ми відчуваємо під час їжі або пиття. Наприклад, поєднання солодкого та солоного смаків у страві може створити унікальний і ситний смак.

Важливо зазначити, що на сприйняття смаку також впливають інші фактори, такі як запах та температура. Аромат їжі може сильно впливати на наше сприйняття смаку. Це пояснюється тим, що ті самі молекули, які надають їжі запах, також сприяють її смаку.

6.3.5. Антропометричні вимоги та умови в конструюванні

Антропометрія є складовою частиною антропології – розділу анатомії і фізіології – науки про біологічну природу людини.

Витоки антропометрії, *на наш погляд,* по праву належать Леонардо да Вінчі і його знаменитій фігурі **Аполона Бельведерського (рис. 6.4).**

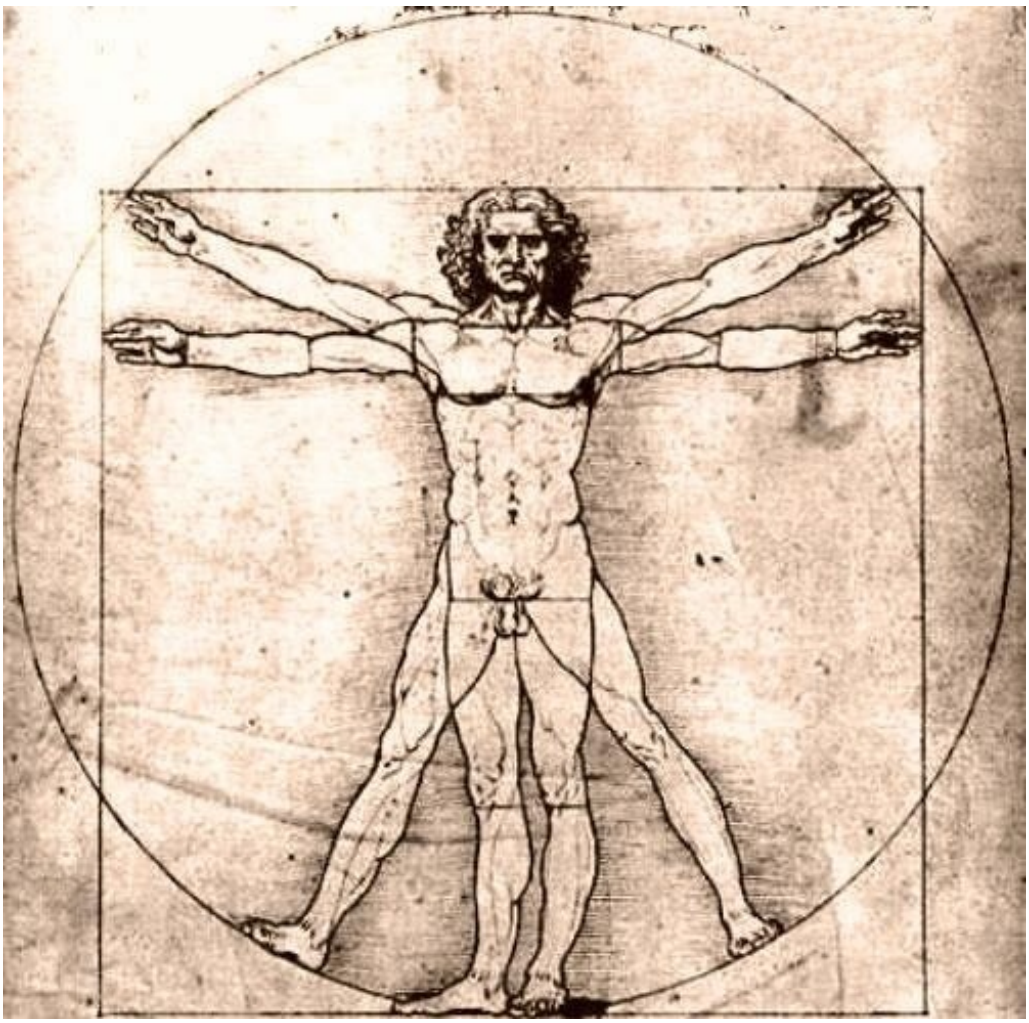


Рис. 6.4. Аполон Бельведерський (Леонардо да Вінчі)

Антропометричні характеристики включають розміри тіла людини та окремих частин; є випадковими величинами у межах людських параметрів, підпорядкованих нормальному закону розподілу. Антропометричні параметри людей різних географічних регіонів дещо відрізняються, що пояснюється відмінністю харчових раціонів та кліматичними умовами.

Так, середній зріст чоловіків народів Азії складає 164 см, західної Європи 174 см, Північної Америки 176 см, Скандинавії 178 см.

Антропометричні дані населення східної Європи наведені в табл. 6.3 та 6.4 і на рис. 6.5 та рис. 6.6 (чоловіки та жінки відповідно). Достовірна імовірність складає 90 %, рівень значимості 10 %, розподілений по обидві сторони розподілу симетрично [23, 56, 59].

Антропометричні дані необхідні спеціалістам в галузі будівництва, архітектури та художникам-конструкторам із найрізноманітніших профілів, починаючи від пошиття одягу, далі конструкторам меблів та завершуючи космічними кораблями. Розрізняють статичні та динамічні антропометричні характеристики. Перші використовуються для встановлення розмірів та параметрів оператора, його місця, а другі – для визначення обсягу робочих рухів, зон досяжності та видимості, створення біомеханічних моделей людини.

У процесі трудової діяльності у людини задіяна як м’язова, так і зорово-мозкова системи, як результат – людина втомлюється, знижується увага та фізіологічна активність, понижується також продуктивність праці. Отже, узгодження розмірів об’єктів з розмірами тіла та його частинами має вирішальне значення для досягнення продуктивності з одного боку, а з іншого – морального задоволення та психічного комфорту, що неодмінно сприяє розвитку суспільства.

Отримувати задоволення не лише відпочинком, але і в праці – мета та завдання розвинутого суспільства.

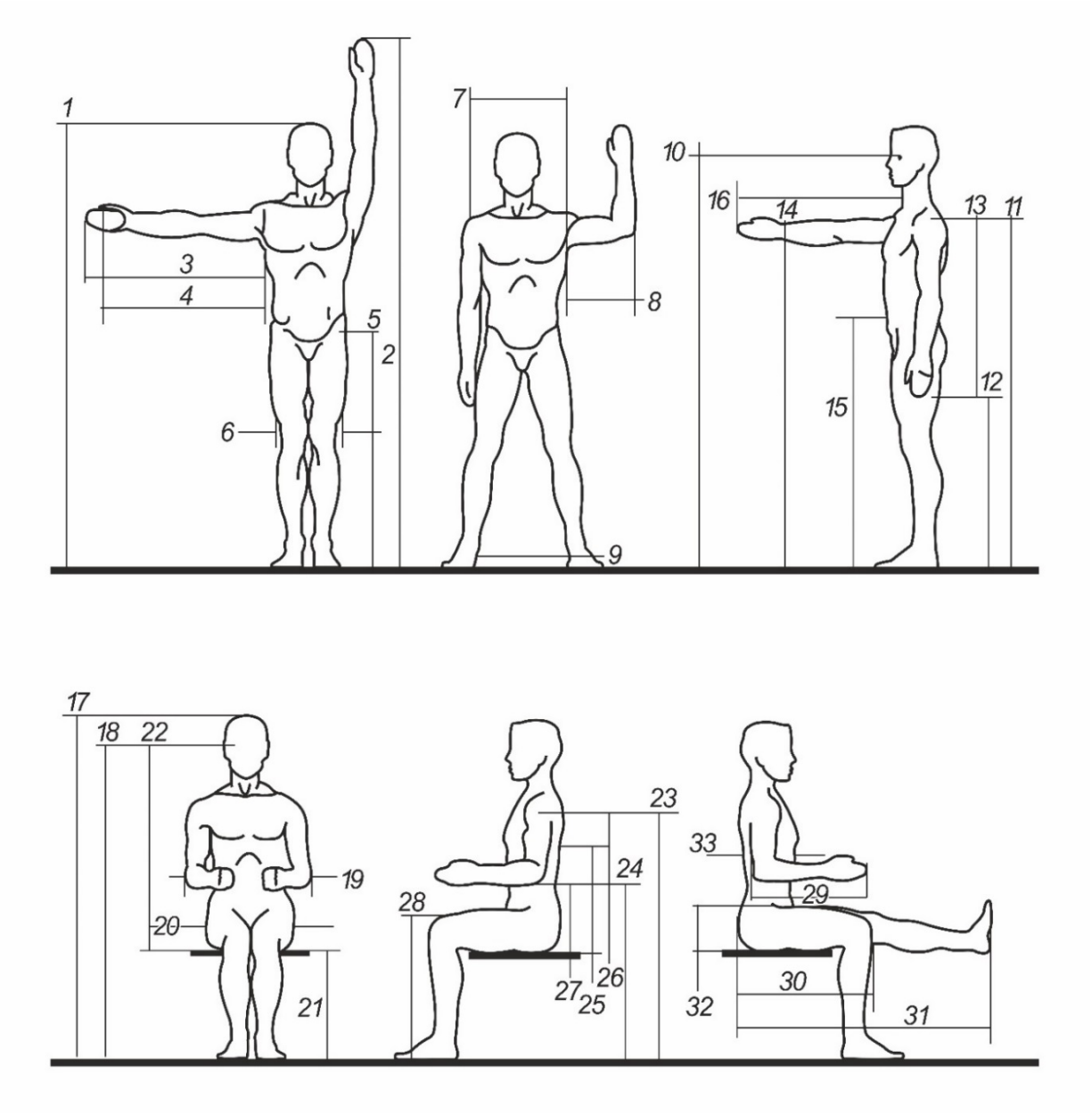


Рис. 6.5. Специфікація розмірів тіла чоловіка [56] (до табл. 6.3)

Таблиця 6.3

Розміри чоловічого тіла для населення Східної Європи за рис. 6.4 [56] (антропометричні дані)

Номер за рис. 6.4	Вимірювана величина	Розмір, мм		
		середній	найменший	найбільший
1	Зріст	1680	1585	1775
2	Зона вертикальної досяжності	2140	2000	2280
3	Довжина руки, витягнутої убік	723	670	777
4	Зона бічної досяжності	622	572	672
5	Довжина ноги	900	830	971
6	Ширина стиснутих колін	230	200	260
7	Ширина плечей	380	350	410
8	Довжина плеча	327	300	355
9	Ширина розміщення ніг	830	710	950
10	Висота очей	1550	1465	1655
11	Висота плечової точки	1370	1280	1460
12	Висота пальцевої точки	620	565	675
13	Довжина руки	754	696	812
14	Висота верхньогрудної точки	1360	1275	1445
15	Висота лінії талії	1035	955	1110
16	Довжина руки, витягнутої вперед	743	688	800
17	Зріст сидячи	1310	1240	1400
18	Висота очей (сидячи)	1180	1110	1250
19	Ліктьова ширина	448	395	500
20	Найбільший діаметр стегон	344	310	380
21	Висота сидіння	422	386	458
22	Висота очей над сидінням	770	720	820
23	Висота плеча над підлогою	1010	940	1080
24	Висота ліктя над підлогою	654	600	710
25	Висота лопаток над сидінням	435	390	478
26	Висота плеча над сидінням	586	543	629
27	Висота ліктя над сидінням	232	190	273
28	Висота коліна	506	466	546
29	Довжина передпліччя та кисті	465	432	500
30	Довжина стегна	590	545	635
31	Довжина ноги	1040	960	1120
32	Діаметр стегна	135	115	155
33	Поперековий розмір	230	184	276

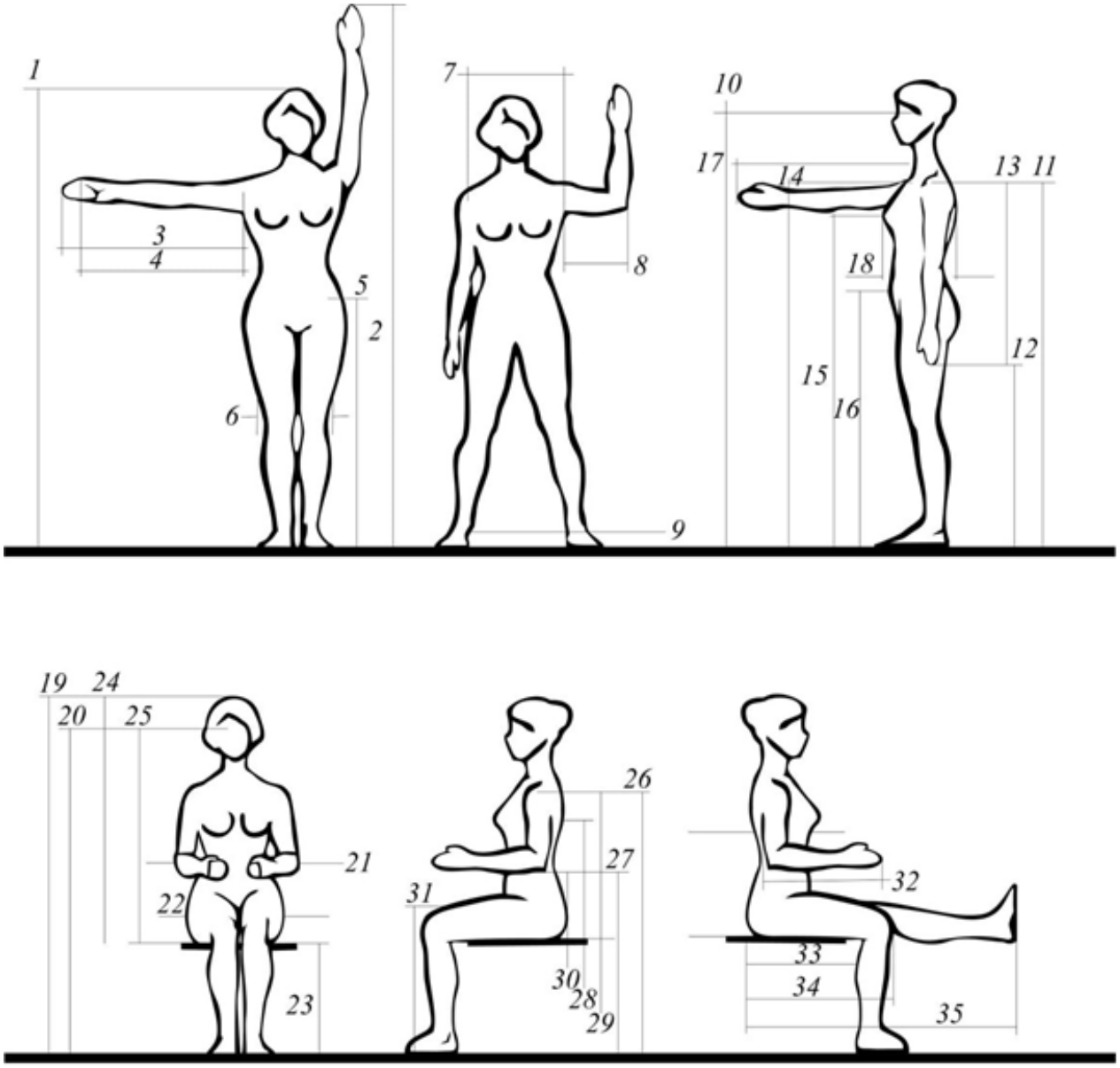


Рис. 6.6. Специфікація розмірів тіла жінки [56] (до табл. 6.4)

Таблиця 6.4

Розміри жіночого тіла для населення Східної Європи за рис. 6.6 [56] (антропометричні дані)

Номер за рис. 6.6	Вимірювана величина	Розмір, мм		
		Середній	Найменший	Найбільший
1	Зріст	1567	1470	1660
2	Зона вертикальної досяжності	1984	1860	2110
3	Довжина руки, витягнутої убік	661	510	711
4	Зона бічної досяжності	568	525	610
5	Довжина ноги	835	765	900
6	Ширина колін	226	200	256
7	Ширина плечей	349	323	375
8	Довжина плеча	302	276	330
9	Ширина розміщення ніг	726	600	846
10	Висота очей	1458	1348	1548
11	Висота плечової точки	1284	1200	1365
12	Висота пальцевої точки	584	524	644
13	Довжина руки	697	646	748
14	Висота верхньогрудної точки	1271	1150	1350
15	Висота соскової точки	—	—	—
16	Висота лінії талії	976	906	1046
17	Довжина руки, витягнутої вперед	686	635	737
18	Найбільший сагітальний діаметр	300	—	—
19	Зріст сидячи	1211	1136	1286
20	Висота очей (сидячи)	1100	1030	1170
21	Ліктьова ширина	452	380	525
22	Найбільший діаметр стегон	388	337	439
23	Висота сидіння	370	334	408
24	Зріст сидячи над сидінням	891	790	890
25	Висота очей над сидінням	725	680	770
26	Висота плеча над підлогою	930	863	1010
27	Висота ліктя над підлогою	605	550	663
28	Висота лопаток над сидінням	426	384	464
29	Висота плеча над сидінням	560	515	605
30	Висота ліктя над сидінням	235	195	276
31	Висота коліна	467	427	507
32	Довжина передпліччя та кисті	427	395	457
33	Довжина стегна редукована	472	436	508
34	Довжина стегна	568	522	614
35	Довжина ноги	983	903	1050

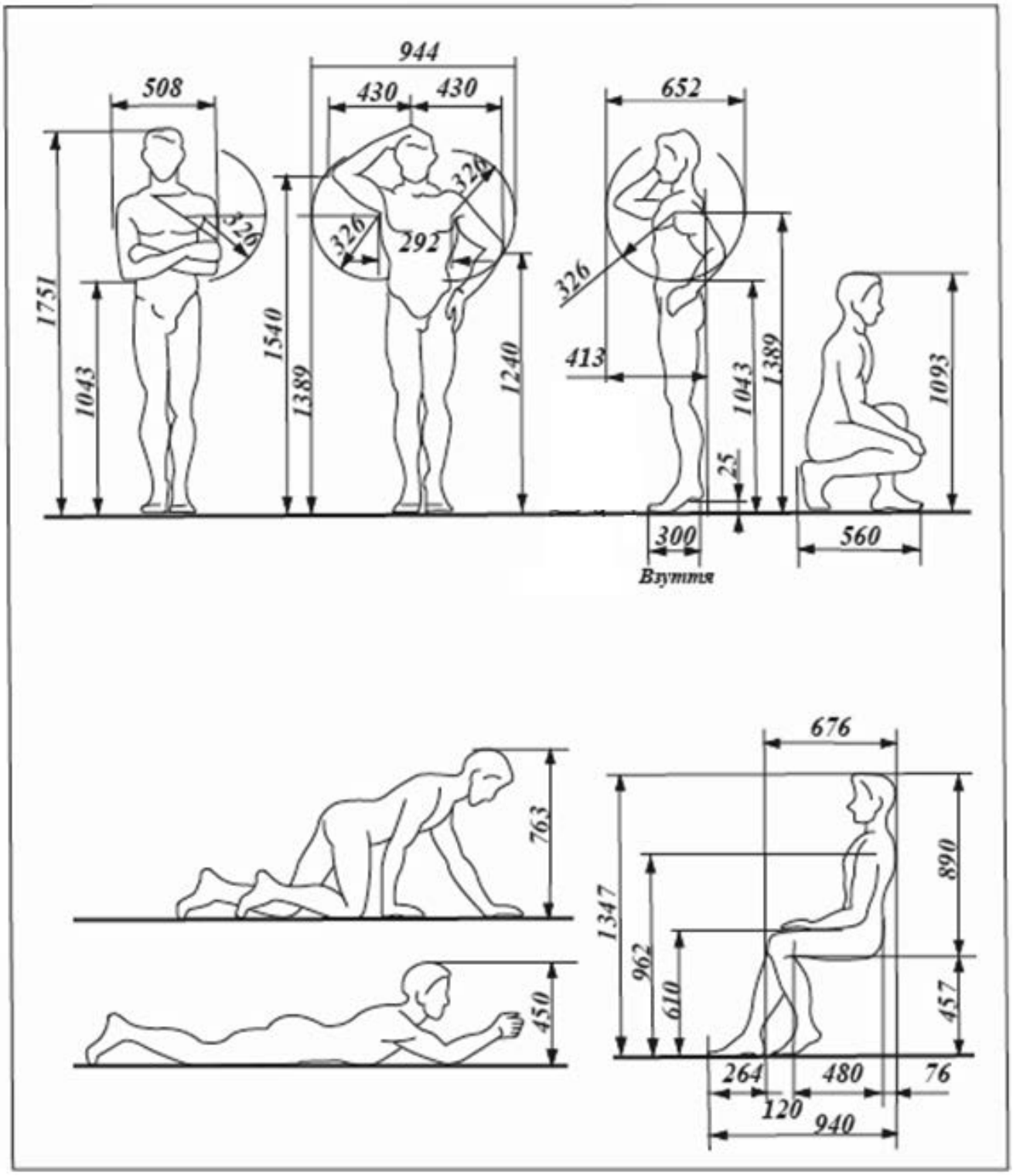


Рис. 6.7. Обмежувальні розміри тіла чоловіка в різних положеннях [56]

6.3.6. Біомеханіка в конструюванні [57 - 60]

При проєктуванні техніки художник-конструктор, окрім знань антропометричних розмірів, має знати функціональні можливості м'язової системи та розподілу маси тіла з одного боку, а з іншого – необхідні зусилля виконання дій. Необхідне також врахування анатомії внутрішніх органів.

Біомеханіка – наука, яка вивчає механічних рух, біологічні причини його виникнення, форми прояву та особливості їх виконання. Разом з цим, біомеханіка в опорно-рухомому апараті людини вивчає ті особливості будови, а також функції, які важливі для досконалості руху. Біомеханічний аналіз дозволяє визначати оптимальні співвідношення, які дають можливість виконувати робочі рухи з мінімальними затратами енергії.

6.3.6.1. Основні поняття

В основі біомеханічного підходу лежать основні положення та поняття для вивчення технічних механізмів. Це поняття ланок, кінематичних пар, кінематичних ланцюгів, ступінь вільності та ступінь рухомості як окремого тіла, так і механізму в цілому. З'єднання двох суміжних ланок утворюють кінематичну пару, а пари натомість утворюють кінематичні ланцюги. У технічних механізмах з'єднання двох ланок – кінематичні пари, побудовані зазвичай так, що можливий цілком визначений, наперед заданий рух.

Сукупність ланок механізму, сполучених кінематичними парами, називають *кінематичним ланцюгом.* Розрізняють замкнені кінематичні ланцюги: кожна ланка входить не менш ніж у дві кінематичні пари, та незамкнені кінематичні ланцюги, в яких є ланки, які входять тільки в одну кінематичну пару.

Використовуються такі аналогії для аналізу параметрів тіла:

тіло – маса, об'єми, амортизатори та (або) пружини; *тканина* – поверхні, що несуть навантаження; *кістки* – ланки, структурні (несучі) елементи, центральні осі, плечі важелів; *суглоби* – кінематичні пари та зчленування; *суглобова рідина* – мастило; *м'язи* – двигуни, амортизатори та (або) пружини; *нерви* – системи управління та зворотного зв'язку; *органи* – генератори, споживачі; *сухожилля* – троси, що передають сили тяги.

Біомеханічна система людини складається з біокінематичних пар і ланцюгів, до яких прикладаються навантаження, які викликають деформації ланок тіла, а також зміну в їх переміщеннях.

Отже, біокінематична пара – це рухоме (кінематичне) з'єднання двох дотичних кістяних ланок, в якому можливості механічних переміщень з'єднаних ними частин тіла визначаються як його будовою, так і керуючою дією м'язів. У біокінематичних парах наявні постійні ступені зв'язку, які визначають ступінь вільності переміщень. Розрізняють такі зв'язки: 1) геометричні – постійне обмеження в переміщенні в деякому з напрямків, зокрема, кістяне обмеження в суглобі, 2) кінематичні – обмеження швидкості, наприклад м'язом-антагоністом.

Біокінематичні пари бувають:

- *поступальні* – одна ланка може переміщатися поступально відносно іншої: наприклад, верикальні рухи нижньої щелепи;
- *обертальні* – повороти в циліндричних і сферичних суглобах тіла; з'єднання, що допускають поворот ланок пари, називають *шарнірами*;
- *гвинтові* – поєднання поступального і обертального рухів, яке зустрічається лише в гомілковостопному суглобі.

Біокінематичний ланцюг – це послідовне незамкнуте розгалужене або замкнуте з'єднання біоланок через біокінематичні пари. Отже, біокінематичні ланцюги бувають незамкнені й замкнені.

У незамкнутих ланцюгах наявна вільна (кінцева) ланка, яка входить лише в одну пару. Значна частина незамкнутих біокінематичних ланцюгів оснащена мультисуглобовими м'язами. Тому рухи в одних суглобах за участю таких м'язів обов'язково пов'язані з рухами в сусідніх суглобах, але можливість ізольованого руху не виключена. При точному керуванні рухами у багатьох випадках цей взаємний зв'язок можна "виключити". Незамкнутий ланцюг може стати замкнутим, якщо кінцева вільна ланка отримає зв'язок деякою опорою або захопленням з іншою ланкою безпосередньо, або ж через довільне тіло.

У замкнутих ланцюгах немає вільної кінцевої ланки: кожна біоланка обов'язково з'єднана двома біопарами. В таких системах ізольовані рухи в одному суглобі неможливі: у цей рух одночасно втягуються й інші з'єднання. Так, згинаючи і випрямляючи ноги при випаді, можна переконатися в тому, що рух в будь-якому суглобі неодмінно викликає рухи і в інших, навіть віддалених ланках. У замкнутих ланцюгах можливостей рухів менше, але управління ними точніше, ніж в незамкнутих.

Участь м'язів у керуванні рухом відкриває можливість для з'єднань множини варіантів рухів. М'язи визначаються як рух кістяних важелів, які передають рух та зусилля, а також сталість та інерцію руху, забезпечуючи функції маятників.

6.3.6.2. Ступені вільності і зв'язку рухів (переміщень)

Якщо у фізичного тіла немає обмежень, тобто зв'язків, то воно може рухатись як поступально в просторі у всіх трьох взаємно перпендикулярних вимірах (Декартові координати), водночас можливе обертання тіла навколо названих осей (кути Ейлера).

Отже, у такого тіла *шість* ступенів вільності руху.

Кінематична пара обмежує рух тіла в просторі. Інакше, кінематична пара накладає зв'язки на його рух. Із шести ступенів вільності кінематична пара віднімає від одного до п'яти ступенів вільності. Кількість накладених зв'язків визначають клас пари – це число, що доповнює кількість координат, які необхідні для опису руху ланки, до цифри 6.

Наприклад, розглядаючи рух кулі по площині, очевидно, що площина накладає на рух кульки лише один зв'язок – обмежує її вертикальне переміщення. Отже, клас пари – перший, тобто число, що доповнює кількість

ступенів вільності (п’ять) до цифри *6*. Нехай *n* – кількість рухомих ланок механізму. Загальна кількість координат, які визначають положення *n*-рухомих ланок у просторі, дорівнює *6n*.

Кожна однорухома кінематична пара (V клас) дає п’ять рівнянь зв’язку, дворухома (IV клас) – чотири рівняння, трирухома (III клас) – три рівняння, чотирирухома (II клас) – два рівняння, п’ятирухома (I клас) – одне рівняння. Якщо всі рівняння незалежні, тобто жодне із них не може бути отримане як наслідок інших, то різниця між кількістю координат та кількістю рівнянь, які пов’язують ці координати, і буде дорівнювати числу ступенів вільності механізму. Тоді:

$$W = 6n - 5p_V - 4p_{IV} - 3p_{III} - 2p_{II} - p_I. \qquad (6.2)$$

Тут p_V, …, p_I – відповідно пари V, …, I класу.

Рівняння (6.2) – це формула Мальцева.

Для плоского руху механізмів загальна кількість координат дорівнюватиме *3n;* тоді формула (6.2) набуде вигляду:

$$W = 3n - 2p_V - p_{IV}, \qquad (6.3)$$

оскільки при плоскому русі положення твердого тіла визначається трьома координатами, а кінематичні пари можуть бути лише дво- та однорухомі, тобто пари четвертого та п’ятого класів. Це рівняння відоме як формула Чебишева.

Кожен зв’язок, що накладається, *зменшує кількість ступенів вільності*:

- зафіксувавши одну точку вільного тіла одразу, відбирають у нього 3 ступені вільності – можливі лінійні переміщення відносно основних трьох координатних осей; приклад: сфероподібний суглоб, у якому зменшилася кількість ступенів вільності до трьох;
- закріплення двох точок тіла відповідає фіксації його на осі, що проходить крізь ці точки – залишається один ступінь вільності;
- закріплення трьох точок повністю відбирає у тіла можливість руху; тому таке з’єднання суглобів не стосується.

До суглобів *з трьома ступенями* вільності відносяться сфероподібні суглоби, де можливі рухи у таких напрямках: поворот; приведення і відведення у фронтальній площині; згинання та розгинання. Такими суглобами є: плечовий, тазостегновий.

До суглобів *з двома ступенями* вільності належать: колінний суглоб, який передбачає згинання і розгинання, а також деякий поворот голені відносно стегна, зап’ястно-п’ясний суглоб великого пальця кисті руки і деякі інші.

Суглобами *з одним ступенем* вільності є плече, ліктьовий, міжфалангові суглоби пальців, спряження стопи з великою стегновою кісткою.

Рух суглобів не допускає невизначеності. Керуюча дія м’язів викликає додаткові зв’язки, залишаючи для руху лише один ступінь вільності, властивий для повнозв’язаного механізму, що вказує на однозначність руху – саме такого,

який потрібний. Із множини можливостей, за допомогою керуючих психомоторних дій м'язів, *виділяється* затребуваний рух.

Аналіз рухів кожного з суглобів показує, у людини практично відсутні чоририрухомі і п'ятирухомі кінематичні зв'язки.

З цієї причини кількість ступенів вільності біомеханічної системи людини обчислюють за спрощеною формулою Мальцева :

$$W = 6n - 5p_V - 4p_{IV} - 3p_{III}. \qquad (6.4)$$

де n – кількість рухомих ланок кінематичного ланцюга, $n = 144$; p_V – кількість ланок з одним ступенем вільності, $p_V = 81$; p_{IV} – число ланок з двома ступенями вільності, $p_{IV} = 33$; p_{III} – кількість ланок із трьома ступенями вільності, $p_{III} = 29$.

Розрахунок загальної кількості ступенів вільності тіла людини:

$W = 6 \cdot 144 - 5 \cdot 81 - 4 \cdot 33 - 3 \cdot 29 = 240,$

але з повною достовірністю їх точна кількість невідома.

Кількість ступенів вільності кінематичного ланцюга опорно-рухової системи людини дорівнює *кількості незалежних джерел механічного руху,* необхідних для приведення у рух тієї чи іншої ланки відносно відповідної осі переміщення суглобу.

Біокінематичне сполучення володіє значно ширшими можливостями, ніж кінематичне з'єднання найдосконаліших технічних механізмів.

6.3.6.3. Структурна схема опорно-рухового апарату людини

Біомеханіка вивчає ті особливості будови і функції тіла людини, її опорно-рухового апарату, які мають найбільше значення для вдосконалення рухових дій; при цьому не заглиблююся у деталі анатомічної будови і фізіологічних механізмів рухового апарату.

Графічне зображення ***структурної схеми опорно-рухового апарату людини*** подане на рис. 6.8.

Ця схема фактично є механічною моделлю тіла людини, за якою можна вивчати закономірності її рухових дій.

Отже, розглянута спрощена модель тіла людини – *біомеханічна система*, основою якої є окремі ланки, які формують *біомеханічні ланцюги* – ланцюги між багатьма рухомо з'єднаними частинами тіла. До цих ланцюгів м'язовою системою прикладаються сили, які викликають рух частин тіла та зміну рухів. Незамкнений ланцюг може стати замкненим, якщо вільна кінцева ланка отримає зв'язок – опору, захват, з іншою ланкою ланцюга або безпосередньо, або через будь-яке тіло. Наприклад, вільна кінцівка (рука, нога) являє собою незамкнений ланцюг. Дві ноги через таз є замкненим ланцюгом.

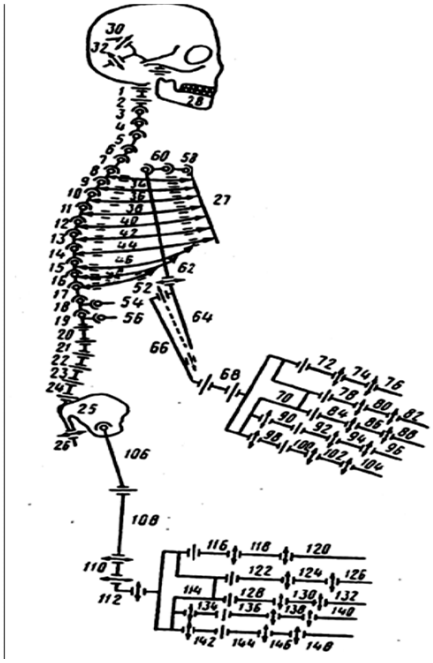


Рис. 6.8. Структурна схема опорно-рухового апарату людини **(за A. Morecrietal, 1981)** [59]

Постійно замкнений ланцюг: *грудина – ребро – хребет – ребро – груднина*. Межі переміщення ноги та стопи – рис. 6.9, кисті руки та кути повороту пальців, – рис. 6.10.

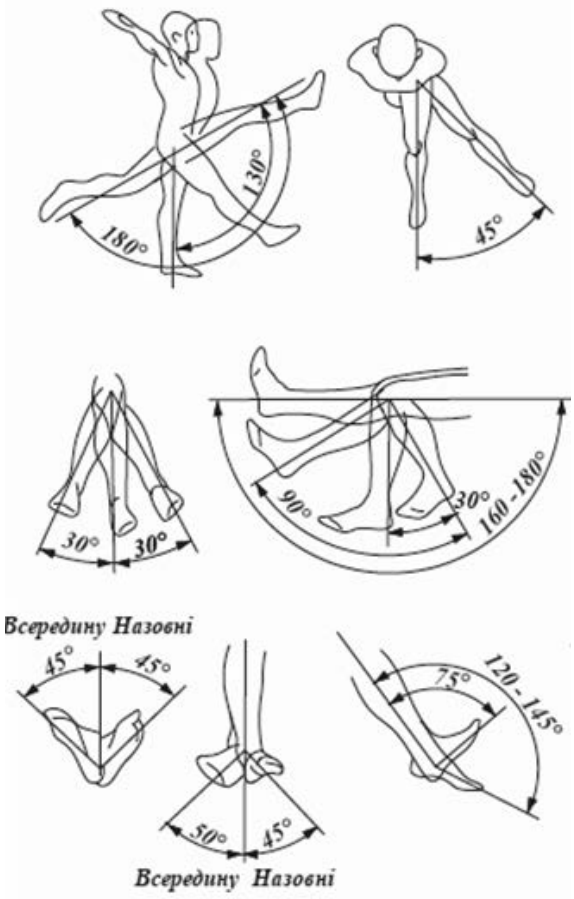


Рис. 6.9. Межі переміщення ноги та стопи

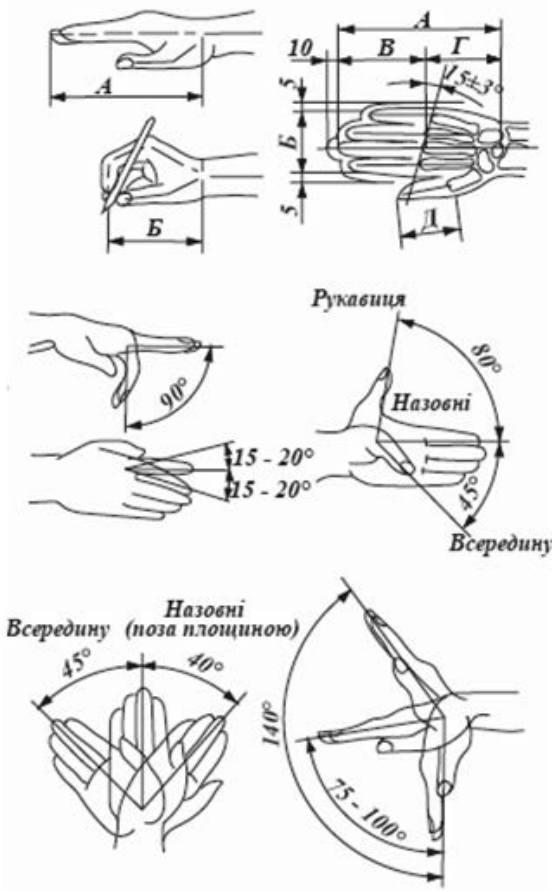


Рис. 6.10. Кисть руки та кути повороту пальців

Дві ноги можуть замкнути ланцюг через опору – наприклад, у положенні випаду. Замкнений ланцюг може розімкнутися, а через це – змінити свої можливості при переході ноги зі стану випаду до звичайного стану. Завдяки переходу ланцюгів із замкненого стану в незамкнений і здійснюється рух людини.

6.3.6.4. Біомеханічні характеристики

Біомеханічні характеристики – це показники, які використовуються для кількісного опису і аналізу рухомої діяльності. Всі біомеханічні характеристики поділяються на *кінематичні*, *динамічні* й *енергетичні.*

Кінематичні характеристики описують моторику рухомої діяльності тіла людини – це міра положення і руху людини у просторі, а саме: просторові, часові і просторово-часові. Кінематика визначає просторову геометрію рухів людини без врахування маси і діючих сил створює зовнішню картину руху.

Динамічні характеристики несуть інформацію про причини виникнення та зміни руху. В біомеханіці сила дії людини – це дія на зовнішнє фізичне оточення, що передається через *робочі точки тіла*. Для розкриття рушійних механізмів, причини їх виникнення та хід змін досліджуються динамічні характеристики, до яких відносять: *інерційні, силові та енергетичні.*

Інерційні характеристики. Властивість інертності тіл розкрита в першому законі Ньютона:

«*Довільне тіло зберігає свій стан спокою або рівномірного прямолінійного руху доти, поки зовнішні прикладені сили не змінять цей стан*».

Збереження швидкості незмінною – рух за інерцією, в реальних умовах можливе лише тоді, коли зовнішні сили, які прикладені до тіла, взаємно врівноважені. Якщо сили неврівноважені, то вони змінюють швидкість тіла відповідно до міри його інертності – маси. Зв’язок між цими величинами відображений у другому законі Ньютона:

«*Зміна руху прямо пропорційна зовнішній діючій силі і відбувається за напрямком прикладення цієї сили*».

Момент інерції тіла – це міра інертності при обертовому русі. Момент інерції відносно осі дорівнює сумі добутку мас всіх матеріальних точок тіла на квадрат їх відстані від цієї вісі.

Поглиблений опис включає динамічні особливості взаємодії м'язів та скелета, особливості пози людини-оператора, розподілу навантажень під час виконання робочих та керуючих рухів.

Енергетичні характеристики дають уявлення про запас енергії, механічну продуктивність та економічні показники.

Біоенергетика рухових дій. У рухових діях відбувається перетворення одних видів енергії в інші – хімічної в механічну і теплову; перетворення механічної енергії: кінетичної в потенційну і навпаки.

Генерація енергії в біомеханічній системі відбувається в результаті:

1) перетворення хімічної енергії тіла в потенціальну механічну енергію напруженого м'яза;

2) перетворення роботи зовнішніх сил в кінетичну енергію біомеханічної системи і потенційну енергію деформованих м'язів і тіла, що переміщується.

Енергія витрачається на:

а) продуктивну роботу;

б) непродуктивні витрати, пов'язані з її перетворенням та розсіюванням;

в) перетворення при накопиченні у розтягнутому м'язі.

Існує щонайменше чотири джерела енергії, що використовується в рухах.

Перше джерело – *діяльність залоз* внутрішньої секреції. Наприклад, адреналін збільшує силу скорочень м'язів і функціональну активність кардіореспіраторної системи. Ендорфіни змінюють діяльність ЦНС, яка впливає на характер рухів.

Друге джерело – біоелектричний потенціал нервових центрів. При додаванні кількох джерел імпульсації утворюється домінанта, тому величина кінцевого біоелектричного імпульсу, що йде по нервових волокнах до м'язів, збільшується.

Третє, безпосереднє джерело енергії рухів – запаси хімічної енергії АТФ у мітохондріях клітин. Це джерело знаходиться в м’язах, інших органах та крові. У м'язах відбуваються хімічні реакції та виникає напруження в скорочувальних елементах: хімічна енергія перетворюється на механічну – потенційну енергію пружно деформованих елементів м'язів. Усі активні рухи відбуваються завдяки перетворенню потенційної енергії напружених м'язів в кінетичну ланок тіла і всього тіла в цілому. Сили тяги м’язів виконують роботу. Робота сили – процес зміни енергії (стану). Завжди, коли змінюється кількість або форма енергії, це наслідок роботи сил.

Четверте, безпосереднє джерело енергії рухів – це механічна енергія зовнішнього оточення (зовнішніх тіл, середовища, партнерів і супротивників). Вона передається тілу за допомогою роботи зовнішніх сил: *а)* кінетичної енергії об'єктів, що рухаються (наприклад, кидок, виконаний противником у боротьбі) і *б)* потенціальної енергії стану (наприклад, рух вниз при зіскоку з поперечини в полі земного тяжіння). У цих випадках спортсмен рухається пасивно.

Біодинаміка м’язів. Основна функція м’язів полягає в перетворенні хімічної енергії в механічну роботу. Головнимим біомеханічними показниками, які характеризують діяльність м’яза, є:

а) сила, що реєструється на кінці м’яза; цю силу називають натягом або силою тяги м’яза;

б) швидкість зміни довжини.

При збудженні м’яза змінюється його механічний стан; ці зміни називають скороченням. Механічні властивості м’яза складні і залежать від механічних властивостей елементів, які утворюють м’яз (м’язові волокна та сполучні утворення), та стану м’язи – збудження, стомлення та ін.

Сили тяги різних м’язових груп людини подані в *таблиці 6.9.*

Таблиця 6.9

Сила деяких м'язових груп людини

М'язова група	Чоловіки		Жінки	
	Кількість випробувань	**Сила, кгс**	**Кількість випробувань**	**Сила, кгс**
Ручна (при стисненні динамометра рукою):				
права рука	3923	38,6	1945	22,2
ліва рука	3923	36,2	1945	20,4
Біцепс:				
права рука	3108	27,9	1744	13,6
ліва рука	3108	26,8	1744	13,0
Згинання кисті:				
права рука	1728	27,9	572	21,7
ліва рука	1728	26,6	572	20,7
Розгинання кисті:				
права рука	1728	23,4	572	18,5
ліва рука	1728	21,8	572	16,5
Великого пальця:				
права рука	2510	11,9	1574	9,0
ліва рука	2510	10,9	1574	8,3
Станова (м'язи, що випростують зігнутий тулуб)	3089	123,1	1745	71

6.3.6.5. Психофізіологічні здібності та реакції людини

Розрізняють *моторні (рухові), психомоторні й сенсорні* здібності та реакції.

Моторні здібності. *Моторні (рухові)* здібності – це індивідуальні, генетично зумовлені в розвитку якісні сторони моторики, які визначають успіх в трудовій і спортивній діяльності людини. Сюди відносять:

- силові здібності;
- здатність до швидкодії;
- витривалість;
- рухливість в суглобах;
- здатність до координації і координованість.

Психомоторні здібності. *Психомоторика* – це рухова діяльність людини, яка управляється її психічною сферою і залежить від розвитку вищої і периферійної нервової діяльності. Психомоторні здібності – це індивідуальні, генетично зумовлені в розвитку якісні сторони моторики людини.

Психомоторні здібності включають низку сенсорних, моторних і когнітивно-розумових здібностей, а саме:

- ефективний самоконтроль і саморегуляція рухової діяльності;
- тонка диференцювальна (розрізняльна) чутливість і коректування рухів за основними параметрами управління (час, простір, зусилля, темп, ритм);

- виразне запам’ятовування і відтворення рухів за основними параметрами управління;
- висока реактивність і оперативність самооцінки своїх розумових дій;
- рівень вольового зусилля і максимальних моторних виявів;
- психомоторна надійність і працездатність.

Розрізняють *загальні і спеціальні* психомоторні здібності.

До загальних психомоторних здібностей віднесені:

- сприйняття (відчуття) часу; наприклад, відтворення на секундомірі коротких (до 2 с), середніх (3 – 5 с) і довгих (6 – 10 с) відрізків часу;
- сприйняття (відчуття) простору.

Ця здатність, на наш погляд, має такі види:

– просторова пропріорецептивна чутливість (вимірюється за допомогою кінематометра). За допомогою пропріорецептивних сигналів з м’язів-антогоністів людина регулює утримання певної пози;
– точність просторового відмірювання (визначається віддаленість предмету від людини). У воді просторове сприйняття віддаленості предметів може спотворюватися;
– просторово-часова чутливість.

Остання здатність, на наш погляд, може виявлятися в двох видах:

а) відчутті швидкості рухів;
б) влучності (точності) балістичних рухів; наприклад, кидки гандбольного м’яча.

Спеціальні (поглиблені) психомоторні здібності характерні для специфічної діяльності людини. Наприклад, діяльності спортсменів у різних видах спорту або людини в різних професійних галузях. Передумови спеціальних здібностей такі:

- сприйняття (відчуття) силових параметрів рухів (наприклад, відтворення зусиль 50 % або 75 % на динамометрі);
- просторово-динамічна чутливість (наприклад, стрибки в довжину з наперед визначеним інтервалом попередніх рухів);
- відчуття ритму (складно-координаційна рухова діяльність, виконувана з певним ритмом, проводиться швидше);
- сенсомоторна координованість, яка забезпечує особливі функції людини (деякі локомоторні акти, процес навчання, мову, міміку обличчя тощо).

Сенсомоторні реакції (функції). *Сенсомоторні реакції* – зворотні дії людини на будь-які відчуття, які сприймаються органами чуттів. Вони характеризуються правильністю, точністю і своєчасністю. Можна вчасно зреагувати, але вчинити неправильно.

Більшість управлінських рухів виконуються після сприйняття та аналізу інформації в сенсомоторних системах, включають спільну діяльність аналізаторних органів та виконавчих рухів. Розрізняють три типи реакцій:

1) проста сенсомоторна реакція;

2) складна сенсомоторна реакція;

3) реакція на рухомий об'єкт у компенсаційній формі або у формі переслідування.

Прості сенсомоторні реакції – це швидка відповідь наперед відомим простим рухом на раптово виявлений сигнал, який теж наперед відомий (швидке натискання кнопки чи інше на сигнал лампочки).

Складні сенсомоторні реакції потребують завдання вибору. Це однозначна відповідь на декілька наперед відомих сигналів, кожному із яких відповідає певна дія. Наприклад, вибір необхідного тумблера та переведення його в необхідне положення. Час реакції при цьому значно перевищує час простої реакції, є функцією складності вибору, кількості інформації, що надходить оператору, і залежить від таких чинників:

- стаж діяльності, позитивний настрій, заняття фізкультурою зменшують час реакції;
- хвороба, вживання ліків, алкоголю, радіація сонця, атмосферний тиск, вік, перевтома, рух у темряві, переляк, поганий настрій збільшують час реакції.

Час реагування складається з *латентного* (прихованого, пов'язаного з обробкою сигналу в нервовій системі) та часу *моторної* дії.

Латентний період – це час від моменту появи сигналу до початку дій.

Латентний час реакції залежить від способу дії і складає:

– на світлове подразнення: 0,16 – 0,18 с;
– на звукове: 0,14 – 0,16 с;
– на больові подразнення:
  електричне шкірне 0,10 – 0,12 с;
  теплове 0,36 – 0,40 с.
– на нюхальне сприйняття пахучих речовин:
  летючих ефірних 0,4 – 0,5 с;
  вуглеводнів 0,7 – 0,8 с;
  епоксидні смоли 0,9 – 1,0 с.

Моторний період – час виконання руху. Час моторного акту залежить від виду та складності траєкторії руху при виконанні операційних дій. Час реакції водія збільшується з віком, хоча з часом досвід у вмінні прогнозувати ситуацію компенсовує сповільнену реакцію. Час реакції водія у місті – 0,75 с, за містом – 2,5 с; залежить від швидкості автомобіля, віку водія, його професійності. Старші за віком водії володіють реакцією 0,5–1,5 с, у водіїв з меншим досвідом час реакції складає 1–2 с.

Повторювані рухи залежать від їх темпу. Максимальний темп при ударах пальцем складає: для мізинця 48–56, безіменного 57–62; середнього 63–69; вказівного 66–70 ударів за 15 секунд.

Максимальний темп натискних ударів для провідної руки складає 6,68 натисків/с, для неведучої – 5,3 натисків/с. При високому темпі сигналів, що йдуть

один за одним, виникає явище *«психічного блокування»*, що проявляється у пропуску сигналів та появі реакцій з великим латентним часом.

Обертальні рухи рук залежать від напрямку повороту й відбуваються швидше при повороті правою рукою направо, ніж наліво.

6.3.6.6. Моторна діяльність оператора

Будь-яка професійна діяльність людини здійснюється у формі моторних дій руками та ногами. Основа цих дій складається з «мікрорухів», які коригуються та здійснюються під контролем центральних механізмів регуляції мозку. Ці дії – складно координована діяльність, до якої залучено майже всі системи організму. Особливими можливостями наділені руки – їх рух не обмежений у формуванні різних траєкторій переміщень в просторі, що забезпечує «безмежну» свободу переміщень: дистальні частини руки можуть переміщатися будь-якими траєкторіями, ніби не мають жодного зв'язку з тулубом.

Рух людини являє собою результат сумісної дії зовнішніх і внутрішніх сил. Зовнішні сили є виразником дії зовнішнього середовища. Внутрішні сили безпосередньо продукуються та керуються людиною, забезпечують належне виконання заданих рухів. У біомеханіці сила дії людини на зовнішнє фізичне оточення передається, як зазначалося, через робочі точки тіла. Робочі точки, дотичні до зовнішніх тіл, передають *рух*, *кількість руху* та *кінетичний момент*, а також *енергію* поступального й обертового рухів зовнішнім тілам.

Робочі рухи оператора. Робочі рухи оператора не відтворюються, а будуються в процесі виконання, тому їх не можна відтворити у просторі – можна створити нову дію, близьку за структурою та метою до попередньо виконаної.

Рухи, які виникають при розв'язку задач переміщення, поділяють на три групи. *Перша* – це пізнавальні дії, направлені на пізнання об’єкту; до них відносять: дотик, обмацування, зіставлення та ін. *Друга* – пристосувальні дії, які складаються з встановлювальних, вивірювальних, зрівноважувальних рухів. *Третя* – виконавчі рухи, за допомогою яких здійснюється дія на орган керування.

Виконавчі робочі рухи за призначенням органів управління поділяють на:

- операції увімкнення, перемикання та вимикання; їхня основна характеристика – час реакції;
- виконання послідовного ряду рухів, що повторюються, при технологічних операціях та операціях кодування, а також при передачі інформації; їхні характеристики: частота, темп і ритм рухів;
- пов’язані з дозуванням рухів за силовими, просторовими та іншими параметрами; використовуються при налаштуванні апаратури та точної установки керованого об'єкта; основний параметр – точність дозувальних процедур;
- операції стеження полягають у безперервному узгодженні положення керувального об'єкта з об'єктом стеження у просторі, що переміщується.

Пряме слідкування полягає в утриманні за допомогою органів керування рухомого об'єкта на заданій траєкторії або його суміщення з іншим об'єктом, що також переміщується. *Компенсаційне слідкування* полягає у виявленні оператором різниці між вхідним та вихідним сигналами та зведення цієї різниці до нуля. Виділяють «позиційне стеження», «стеження за швидкістю», «стеження за прискоренням». Оператор під час виконання завдань стеження розглядається як ланка у системі управління.

Моторне поле. Робочі рухи оператора здійснюються в межах моторного поля – частини робочого місця, де розташовані органи управління (рис.6.11).

У моторному полі виділяють три зони: 1 – зона оптимальної досяжності, в якій розміщують найважливіші органи управління і які використовуються найчастіше (більше 2 разів за хвилину); 2 – зона легкої досяжності, в якій розміщують часто використовувані (2 рази за хвилину) органи управління; 3 – зона досяжності, в якій розміщують рідко використовувані (менше 2 раз за хвилину) органи управління.

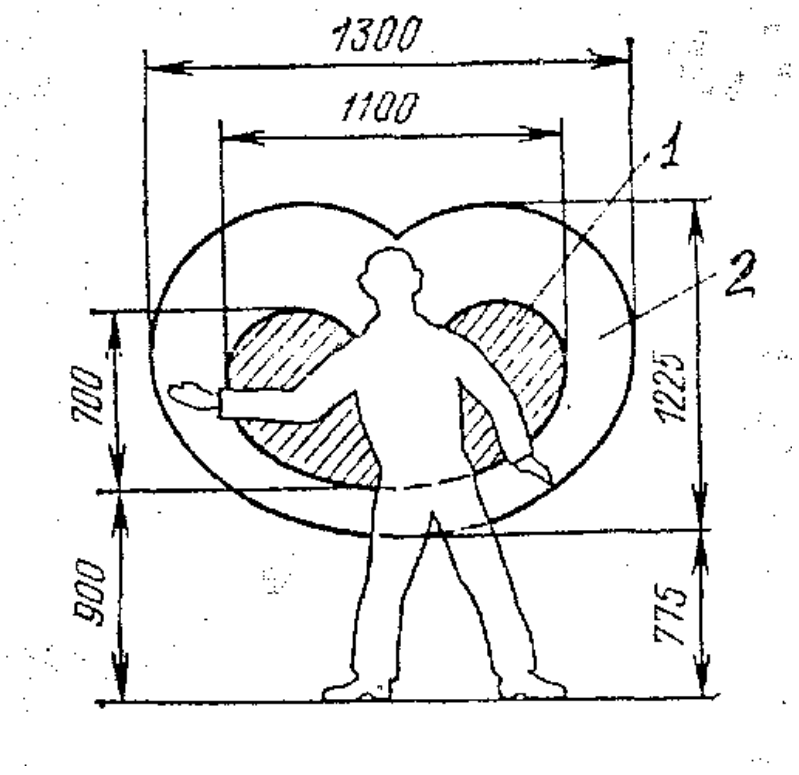


Рис. 6.11. Зони в моторному полі при виконанні ручних операцій в робочій позі "стоячи":
1 – оптимальна робоча зона; 2 – зона досяжності рук при фіксованому положенні ніг

Зони в моторному полі при виконанні робочих операцій при робочій позі "стоячи" наведені на рис. 6.11.

Робоче місце токаря (рис. 6.12), як бачимо, поділено також на зони. Дугові контури на рисунку – зони досяжності. Специфікація зон указана в підписах до рисунка.

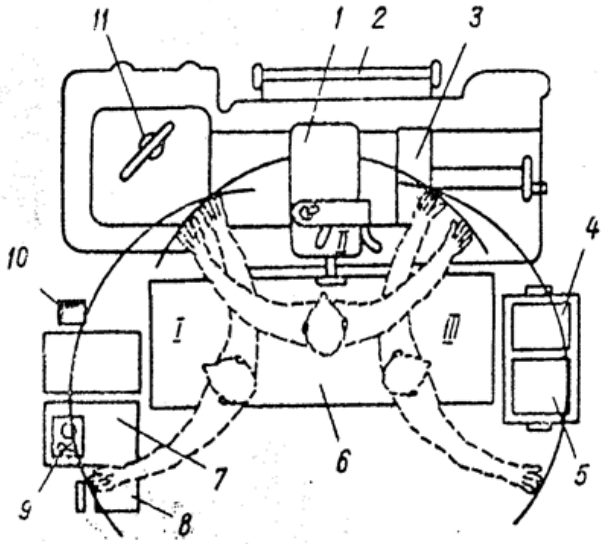


Рис. 6.12. Організація робочого місця токаря:
1 — зона обслуговування, II — робоча зона, III — зона розміщення заготовок та деталей
1 – верстат, *2* – екран, *3* – лоток, *4* – столик, *5* – тара, *6* – грати, *7* – тумбочка, *8* – стілець, *9* – пульт зв'язку, *10* – урна для сміття, *11* – планшет для креслень

6.3.7. Симетрія та асиметрія фізіологічних можливостей людини

Тіло людини має симетрію. Однак існують відмінності у лінійних, вагових, об'ємних розмірах, структурі і функціях парних органів і симетричних частин його тіла. Відповідно до здібностей та реакцій, у людини розрізняють *моторну, сенсорну та психічну* асиметрії. Ці особливості проявляються як результат генетично-наслідкових причин, а також соціальних, клімато-географічних та інших впливів.

Моторна асиметрія – це сукупність ознак нерівності функцій рук, ніг, м'язів правої і лівої половини тулуба й обличчя. Проявляється також у різноманітних рухових можливостях м'язів правої та лівої половини тулуба особи.

Провідна кінцівка. Визначають за такими ознаками:

1) її перевага при виконанні дій однією рукою або ногою;
2) вища *ефективність за силою, точністю та швидкістю реакції;*
3) *домінування при* сумісній діяльності обох кінцівок.

У більшості людей (75% випадків) права рука провідна, а пов'язана з нею ліва півкуля мозку домінантна. У праворуких (правшів) функція мови також контролюється лівою півкулею, в якій розташований моторний мовний центр Брока. Значно менше серед населення ліворуких (людина-шульга), приблизно 5–10%, а оборуких (амбідекстрів) – 15–20%. Серед жінок ліворуких зустрічається у 2 – 3 рази менше, ніж серед чоловіків.

У правшів провідна *права рука,* як правило, переважає ліву за довжиною, розміром кисті, величиною нігтевого ложа великого пальця. Вона має більшу м'язову масу, м'язові волокна товстіші й сильніші. У праворуких людей центральне керування рухами правої та лівої рук неоднозначне. *Моторика*

правої (провідної) руки виконується переважно за механізмом центральних команд, тобто більш підпорядкована процесам свідомого керування під дією кори головного мозку. Рушійні навички формуються швидше і легше автоматизуються. *Управління лівою рукою* у правшів у рядових умовах істотно відстає від ведучої правої за своїми координаційними можливостями. Але в екстремальних ситуаціях, при виконанні багатоцільових дій, коли створюються незвичні ускладнення для програмного управління діями правої руки, ефективність лівой руки більш висока. Виявлено, що м'язи неведучої лівой руки містять більше швидких м'язових волокон, володіють вибухово-імпульсними скорочувальними властивостями, але більшою мірою підлягають стомлювальності.

Перевага правої руки не супроводжується обов'язковим домінуванням правої ноги. Найчастіше, а саме у 70% випадків, у праворуких людей ведуча ліва нога, тобто має місце так звана перехресна асиметрія. Лише для п'ятої частини населення характерна наявність провідної правої руки та правої ноги і лише близько 5% людей мають провідні ліву руку та ліву ногу.

Перехресна асиметрія, характерна для правшів, дуже мало виражена у шульг: лише в 7% випадків у ліворуких людей виявляється провідна права нога.

Різні моторні можливості кінцівок проявляються при різних видах локомоцій – ходьбі, бігу, плаванні та ін. У русі правші відхиляються вліво, дістаються до початкового пункту, описуючи рух по колу. При виключеному зорі прямолінійний рух зникає в межах 100 м.

Сенсорна асиметрія. Особливого значення у поведінці людини має *асиметрія зору*. Приблизно дві третини населення має правосторонню асиметрію, тобто провідне праве око, близько третини – лівосторонню, і лише деякі – симетрію зорової функції. Провідне око має вищу гостроту зору, миттєве і особливо яскраве сприйняття кольору, ширше поле зору, найкраще відчуття глибини простору. При прицілюванні сприймається лише те, що входить у поле зору цього ока. У цілому, сприйняття об'єкта більшою мірою забезпечується провідним оком, а сприйняття навколишнього фону – непровідним.

При ізольованому зоровому подразненні правого або лівого ока виявлено перевагу правого поля зору і, відповідно, лівої півкулі.

Ізольоване звукове подразнення лівого або правого вуха показало своєрідність функціональної *асиметрії слуху*. Мовні сигнали краще сприймаються правим вухом у переважної більшості правшів і в половини шульг, а музика, інтонації мови, її емоційне забарвлення – лівим вухом. У жінок майже в 2 рази частіше відзначається перевага правого вуха у сприйнятті мовних стимулів, ніж у чоловіків.

У функціях дотику, нюху та смаку більше виражена лівостороння асиметрія. На лівій руці вища тактильна, больова, температурна та вібраційна чутливість, на правій руці – кінестетична чутливість. Ліва сторона носа чутливіша.

Особливістю жіночого організму є значно менший прояв функціональної асиметрії лівої і правої півкулі в здійсненні мовної функції. Функції промови пов'язані переважно з діяльністю обох півкуль.

У жінок значно частіше буває провідність правого ока і майже в 2 рази частіша перевага правого вуха у сприйнятті мовної інформації. В індивідуальному профілі асиметрії в них частіше виражена правостороння асиметрія.

Функціональна «асиметрія-симетрія» проявляється у спортивній діяльності. Природжені морфофункціональні асиметрії визначають перевагу правої або лівої кінцівки при виконанні різних дій з предметом або без нього – вибір озброєної руки у фехтувальника, правостороннього або лівостороннього хвату ключки у хокеїста, сторони вдиху при плаванні кролем – лівосторонній або правосторонній та ін. Визначення моторної асиметрії лише за вродженими ознаками показало, що серед спортсменів переважають праворукі (51% випадків) над ліворукими (35% випадків), але при визначенні за зазначеними рухами виявлено переважну перевагу правої руки (97% випадків) над лівою 2% випадків). Це свідчить про роль навчання у розвитку функціональної асиметрії. Нерівномірний морфологічний розвиток, одностороннє переважання фізичних якостей та асиметрія рухових дій особливо виражені в асиметричних вправах при більшому спортивному стажі та більш ранній спеціалізації. При симетричних циклічних вправах провідна кінцівка виконує активніші дії, регулюючи роботу неведучої.

Провідна нога розвиває великі зусилля і робить довші кроки в легкоатлетичному бігу, при пересуванні на лижах і лижеролерах, бере активну участь у виконанні поворотів, в обгоні суперників на дистанції.

В асиметричних ациклічних вправах (наприклад, удари по м'ячу у футболістів) технічні прийоми виконуються в основному провідною кінцівкою, а неведуча здійснює допоміжну функцію, роль опори. При виконанні стрибків (у фігурному катанні та ін.) ведуча нога махова (у більшості спортсменів – права), а неведуча (опорна) – штовхальна (ліва нога). Ліву ногу як штовхальну використовують до 90% стрибунів у висоту, приблизно 60% стрибунів у довжину.

6.3.8. Пізнавальні процеси, зберігання інформації та прийняття рішень

Пам'ять – це комплекс психофізіологічних процесів, що відбуваються в центральній нервовій системі, які забезпечують збереження, нагромадження та відтворення інформації, а також слугує основою для реалізації всіх видів діяльності, навчання та розвитку людини. *Пам’ять* – основний процес у корі головного мозгу, що визначає пізнавальні (когнітивні) здібності людини. В пам’яті відображаються всі грані людського досвіду, і не тільки когнітивного, а й емоційно-вольового.

У залежності від рівня розгляду та вибраних пріоритетів для класифікації розрізняють такі види пам’яті:

- ***рухова;***
- ***зорова (образна);***
- ***слухова;***
- ***тактильна;***
- ***нюхальна та смакова;***
- ***емоційна;***
- ***вербальна.***

Рухова пам'ять лежить в основі навчання рухам, вироблення побутових, спортивних і трудових навичок, навичок письма. *Зорова пам'ять* забезпечує запам'ятовування та відтворення в уяві обличчя людей, картини природи, а також маніпуляційні прийоми, які вимагають особливої уваги. *Слухова пам'ять* дає змогу розрізняти та контролювати звуки, їх природу (походження), що особливо важливо при роботі з механізмами і машинами, сприймати аварійні звукові сигнали. *Тактильна* – розрізняти поверхні на дотик, їх природу, інформацію (шрифт Брайля). *Нюхальна та смакова* – властивість розрізняти різноманітні запахи та смакові якості. *Емоційна пам'ять* зберігає пережиті людиною почуття, це співчуття іншій людині. Запам'ятовуванню сприяють біологічно активні речовини, які виділяються під час емоційного збудження.

Виділяють також *вербальну пам'ять,* яка полягає у запам'ятовуванні, збереженні й відтворенні прочитаного, почутого або мовленого.

Пам'ять людини об’єднує в одне ціле інформацію **про минуле та сьогодення,** що дозволяє **прогнозувати майбутнє.** Отже, пам**’**ять забезпечує існування людини в часі, можливість використання знань про минуле для побудови майбутнього.

Витоки пам’яті – *генетична та набута.* Організація пам’яті – ієрархічна багаторівнева, у вигляді вузлів і зв'язків. Виділяють основні процеси пам'яті – *запам'ятовування, збереження, забування та відновлення (відтворення).*

За тривалістю розрізняють короткочасну та довготривалу.

Короткочасна пам'ять зберігає інформацію під час обмеженого, переважно невеликого проміжку часу. Особливістю цієї пам'яті є заміщення, коли при перенасиченості пам'яті інформація, що надходить, частково витісняє ту, що там зберігається. Завдяки короткочасній пам'яті людина може опрацювати значний обсяг інформації, знищити непотрібну та забезпечити запам'ятовування у довгочасній пам'яті необхідного матеріалу. *Довготривала пам'ять* розрахована на довгий, заздалегідь не окреслений термін збереження інформації. Має практично безмежний обсяг, але обмежені можливості довільного пригадування повідомлень, які у ній зберігаються.

При розгляді людини як системи перетворення інформації розрізняють такі види пам’яті: *декларативну, оперативну (робочу) і процедурну.*

Декларативна пам’ять **–** довготривала, концептуальна або семантична пам’ять в залежності від контексту і смаків автора. Саме тут зберігаються дані, необхідні для операторської діяльності. Основна функція – запам’ятовування вхідної інформації. Об’єм – практично необмежений, пов’язаний з динамічною організацією інформаційних процесів. Зміст – семантичні, просторові, акустичні, рушійні й часові коди. Інформаційні одиниці – терміни, поняття, схеми.

Оперативна пам’ять. Займає проміжний стан, розрахована на збереження матеріалу впродовж наперед заданого терміну. Основні компоненти оперативного мислення: 1) структурування – утворення більших одиниць дії шляхом зв'язування елементів ситуації між собою; 2) динамічне впізнавання – прогноз кінцевої ситуації у вихідній; 3) формування алгоритму рішення – вироблення принципів та правил

розв’язання задачі, визначення послідовності дій у кожному конкретному випадку. Робоча пам’ять тотожна оперативній пам’яті. Інженерна психологія виділяє насамперед «оперативне мислення» – процес виконання практичних завдань, у результаті якого формується модель передбачування діяльності та процедури, що дозволяє виконуваті ці завдання ефективно.

Процедурна пам’ять – зберігання знань про те, як щось можна зробити. Вона є різновидом декларативної пам’яті, відрізняється наявністю в ній логічних правил, які дозволяють робити висновки про необхідні дії та інформацію, як саме це зробити. Об’єм інформації, яка надається оператору в робочих умовах, не повинен перевищувати оперативних можливостей.

В операторській діяльності процеси короткочасної та довготривалої пам'яті практично йдуть паралельно та взаємопов'язано.

Пам'ять служить основою складніших когнітивних утворень, на основі яких людина організовує свою діяльність, – це *мислення та увага.*

Мислення – найвища форма відображення реальності та свідомої цілеспрямованої діяльності людини, що спрямована на опосередкування, абстрактне узагальнене пізнання явищ навколишнього світу, суті цих явищ, зв'язків між ними. Вся розумова діяльність (судження, розуміння, формування понять) складається з таких розумових операцій: аналіз, синтез, порівняння, узагальнення, абстракція і конкретизація.

Аналіз – це мислений поділ предмета, явища, процесу на складові частини, ознаки, властивості та виділення цих компонентів.

Синтез – мислене поєднання в єдине ціле окремих частин, ознак, властивостей предметів, явищ або понять.

Узагальнення – виділення на підставі порівняння головного, загального, особливого або часткового, характерного для явища, предмета, об’єкта.

Абстракція – виділення суттєвих особливостей групи предметів, явищ, або понять.

Конкретизація – перехід від загального до часткового, зв’язок теорії з практикою, перехід до конкретної дійсності, до чуттєвого досвіду.

Розрізняють три види мислення: наочне діюче, пов'язане з практичною діяльністю; *образне*, при якому предмети безпосередньо не сприймаються, а уявляються в пам'яті (уявлення деяких технологічних операцій); *абстрактне,* коли вивчаються загальні поняття і закономірності.

Особливий тип мислення, необхідний оператору – оперативне мислення, яке здійснюється в ході практичної діяльності та спрямоване на розв'язання конкретних практичних задач і характеризується швидкістю.

Властивості мислення, такі як швидкість, винахідливість, кмітливість, точність дії при раптовій зміні ситуації вимагають спеціального тренування як в реальних умовах, так і шляхом моделювання складних ситуацій чи окремих їх елементів за допомогою тренажерів і спеціальних методів.

Увага – це спрямованість та зосередженість у свідомості на об’єктах або явищах, що сприяє підвищенню рівня сенсорної, інтелектуальної та рухової активності. Людська свідомість постійно спрямована на деякі об’єкти, думки чи діяльність. Увага пов’язана з волею. Залежно від волі увага буває *пасивною* і

активною. *Пасивна увага* виникає без свідомого вольового зусилля під впливом зовнішніх подразників і триває до тих пір, поки вони діють (сильний звук, світло тощо). Це низька форма уваги, яка виникає за законом орієнтовного рефлексу і є спільною для людини і тварини. *Активна увага* – свідома увага, яка вимагає вольового зусилля і завжди спрямована на сприйняття об'єктів і явищ з наперед поставленою метою (праця оператора). Пасивна і активна увага взаємодіють і доповнюють одна одну. Активна увага, вимагаючи вольового зусилля і нервового напруження, швидше втомлює людину. До основних функцій уваги належать вибір впливів, регулювання і контроль діяльності до тих пір, поки не буде досягнуто її мети. Увагу характеризують *концентрація, стійкість, розподіл, переключення й обсяг*.

Концентрація уваги – це стан свідомості, необхідний для того, щоб включитися в діяльність, зосередитися на завданні.

Стійкість уваги – це тривалість привертання уваги до одного й того самого об'єкта або завдання. Стійкість мимовільної уваги, що виникає без зусилля всього 2–3 с; довільна увага досягається вольовим зусиллям, послаблюється через 15 хв напруженої праці.

Розподіл уваги – це здатність людини одночасно концентрувати увагу на декількох об'єктах, що дає можливість виконувати одразу декілька дій.

Переключення уваги – це зворотний бік розподілу уваги. Вимірюється швидкістю переходу від одного виду діяльності до іншого. Недостатнє перемикання уваги призводить до неуважності.

Обсяг уваги – це кількість предметів або явищ, що їх людина утримує одночасно в своїй свідомості. За всіх обставин управління увагою – передумова ефективної життєдіяльності та безпеки людини.

Неуважність – протилежність уваги і умовно поділяється на три ступеня:

- неуважність через слабкість та нестійкість активної уваги як результат психічних причин або неготовності діяти;
- слабка інтенсивність уваги при перевтомі, у хворобливому стані чи після вживання алкоголю. Характеризується слабкою концентрацією і ще слабшим перемиканням. Найчастіше увага знижується при перевтомі;
- надмірна інтенсивність і трудність перемикання уваги як результат зосередження на певному різновиді діяльності, питаннях чи проблемах під впливом надмірних особистих переживань.

Правила тренування уваги:

- уважно виконувати роботу завжди і в будь-якій ситуації;
- зосереджувати увагу в будь-який момент на певному предметі чи діяльності;
- ставитись із зацікавленням до предмета чи роботи, що підвищує увагу;
- чітка організація праці і здоровий психологічний клімат в колективі;
- дисциплінованість, рішучість і наполегливість;
- постійні вольові зусилля.

Те, що ми робимо, має бути добрим (якісним),
але це не означає, що воно не може бути ще кращим.

Я. Дітріх [5]

7. Зовнішня геометрична структура виробів

[2, 50–62]

7.1. Фактори впливу на зовнішню форму виробу

Взаємозв’язок факторів зовнішніх умов та мотивацій виробництва, експлуатації виробів, які визначають їх конструкцію взагалі та зовнішню геометричну структуру зокрема, представлені спрощеною схемою на рис. 7.1 [2].

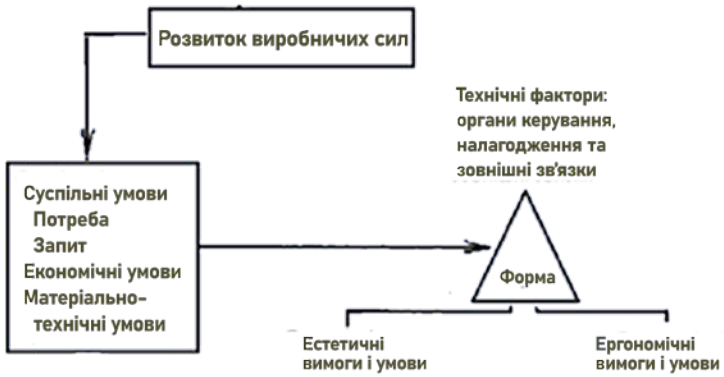


Рис. 7.1. Величини і впливи, які визначають форму виробу

Аналіз структури наведеної схеми вказує на те, що конструкція виробу та її форма зокрема формується станом виробничих сил та суспільних умов епохи виробництва з одного боку, а з іншого – застосуванням виробу та його зв’язків з оточенням. Ця схема, відповідно до назви, включає всі фактори формування форми, від планування його розробки і до оцінки можливостей збуту та особливостей експлуатації. Конкретизація процесу вибору форми наочно розкриває та виявляє взаємозв'язки функціональної структури виробу з навколишнім середовищем, які проявляються через ергономічні та естетичні реакції людини на технічні, в тому числі й комунікативні функції. Цей процес нерозривно пов'язаний з конкретизацією зв'язків, що зазвичай повністю описуються за допомогою фізичних величин, які виявляють технічне призначення системи (приладу).

Конструкторське рішення щодо форми виробу має відповідати споживчим, ергономічним властивостям та екологічним вимогам, які при теоретичному аналізі подаються у вигляді функцій та умов застосування цього виробу.

Зовнішня геометрична структура (ЗГС) представлена вдосконаленою, в порівнянні з [2], діаграмою ***Вена*** (рис.7.2), поданою у формі **технічної, естетичної та ергономічної** функцій.

Четверта складова *ЗГС* – **функція захисту** [59].

Діаграма, як бачимо, графічно відображає фактори, указані на схемі рис.7.2, які в подальшому виступають функціями зовнішньої геометричної структури. Зони перекриття функцій виявляють альтернативні проблеми, розв'язки яких відображені у задачах оптимізації. Виявлення цих проблем необхідні при конструюванні систем захисту внутрішньої структури виробу.

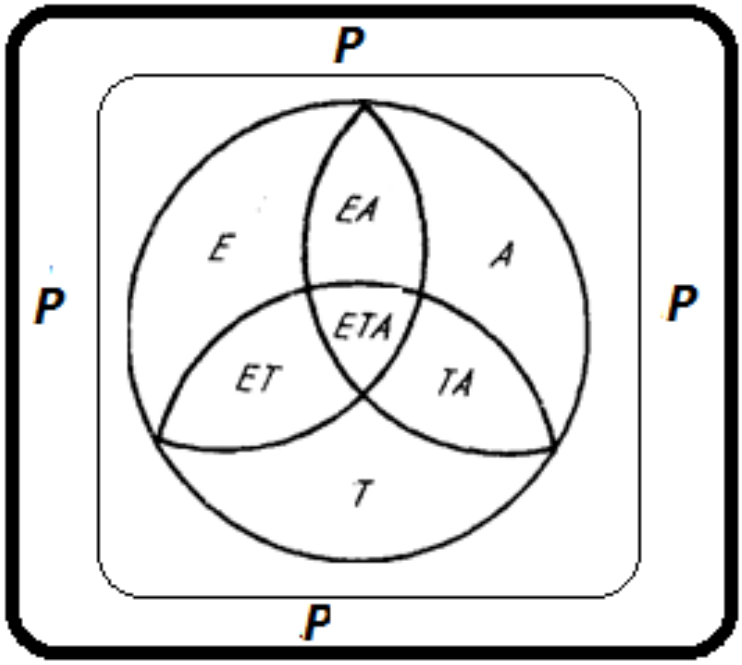


Рис. 7.2. Удосконалена діаграма Вена, що пояснює взаємозв'язок факторів (незалежних і загальних), які визначають форму виробу:

E – ергономічні; *A* – естетичні; *T* – технічні; *P* – захист

7.2. Функції зовнішньої геометричної структури

7.2.1. Технічна функція

7.2.1.1. Конструктивні елементи забезпечення технічної функції

В основі застосування приладу – його технічна функція та умови, які забезпечують реалізацію цієї функції. У процесі конкретизації геометричного конструктивного вигляду проявляється призначення відповідно до класифікаційної групи приналежності приладу (технічна класифікація), а саме:

1) вимірювальні;
2) прилади-генератори;
3) регулювально-керувальні.

Для *вимірювальних приладів* характерна наявність датчика фізичної величини, яка підлягає вимірюванню. Розташування датчика може бути як поза межами корпусу приладу, тобто окремим блоком, так і в межах корпусу. Наступна особливість – це наявність системи зорового зчитування вимірювальної величини. Зчитування здійснюється: 1) круговою шкальною відліковою системою; 2) прямолінійною шкальною відліковою системою; 3) світним цифровим відліком; 4) голосовим коментарем.

Технічну функцію виконують такі групи елементів зовнішньої структури:

1) homoios-комунікативні: елементна база, яка забезпечує зв'язки з людиною; це органи керування приладом, реакція приладу на команди (світлові, електричні, магнітні та електромагнітні фактори), навігатори (візуальна, слухова або інше), реєстрація інформації органами чуття (зір, слух, нюх, дотик);

2) техно-комунікативні: елементна база, яка забезпечує інформаційні зв'язки складових частин приладу в межах власного технічного комплексу або ж зв'язки з іншими технічними системами; це роз'єми, кабелі, проводи та бездротові зв'язки, з використанням фізичних полів: світлових, електричних, магнітних, електромагнітних;

3) Захист внутрішньої структури (кожух, корпус).

7.2.1.2. Характеристика апаратури

Технічний чинник, окрім функціональних потреб, включає в себе спосіб експлуатації та доступ до апаратури. За способом експлуатації розрізняють:

- стаціонарні;
- пересувні;
- переносні, портативно-переносні;
- ремонтоздатні;
- зовнішнє спеціалізоване технічне обслуговування або ж внутрішнє (тобто персоналом, який експлуатує прилад).

За доступом до апаратури:

- відкритого типу;
- висувні;
- розворотні;
- такі, що розкриваються.

7.2.1.3. Захист технічної системи

Загальні питання. Зовнішня обшивка, корпус, кожух – такі терміни можна зустріти в описі зовнішньої структури виробів. Класифікацію цієї структури можна провести за такими ознаками: матеріал, геометрична форма, технологія форми.

Матеріал: метал, пластмаса, прес-пап'є [60, 61]. Вибір матеріалу продиктований плановим терміном експлуатації, зовнішніми та внутрішніми

навантаженнями, такими як кліматичні, механічні, електромагнітні або теплові. *Метал* – переважно алюмінієвий сплав, листова сталь, або ж зі спеціальними властивостями, напр., пермалой. *Пластмаса* – сьогодні наявні найрізноманітніші фактури, серед яких класика – вініпласт, текстоліт, гетинакс. Геометрична форма – переважно плоскі пластини, суцільні або ж з отворами круглої чи прямокутної форми.

Верх приладів – дашок, переважно без отворів або ж з отворами жалюзійного типу, що запобігає потраплянню сторонніх предметів усередину приладу при їх випадковому потраплянні на дашок. Зустрічаються конструкції корпусів замкнуто-зварні, з єдиною лицьовою проймою або ж кількома. Матеріали корпусів сучасних приладів переважно пластикові або комбіновані (пластик – оргскло – метал), що ми зустрічаємо у побутовій техніці (телевізор, оргтехніка), до того ж естетично-опуклої форми.

Герметизація приладів. Застосовується як до приладу в цілому або ж до окремих блоків з метою забезпечення непроникності до внутрішньої елементної бази рідин або газів, запобігання потраплянню всередину бруду, піску, пилу, грибкової плісняви.

Розрізняють часткову, індивідуальну або й повну герметизацію. При *частковій* герметизації застосовують просочування, обвалювання або залив компонент приладів лаками, пластмасами і компаундними смолами.

Індивідуальна герметизація окремих вузлів допускає їх заміну при втраті працездатності і роздільний ремонт. При *повній* герметизації, яка простіша і дешевша за індивідуальну, заміна компонент і ремонт практично неможливий і вимагає заміни блока. Вибір способу герметизації залежить від терміну планової працездатності виробу і від якості комплектуючих компонент. Найпоширеніший спосіб герметизації – повітряне або газове заповнення внутрішнього об’єму, на противагу заповненню компаундом, який погіршує тепловий обмін і ускладнює заміну компонент, що вийшли з ладу. Герметичність роз’ємного корпусу досягається ущільненням стиків корпусу з кожухом, використанням еластичних прокладок та спеціального профілю поверхонь ущільнення.

7.2.1.4. Такелаж

Необхідно забезпечити можливість машинного переміщення (такелаж) важких виробів, агрегатів, деталей та вузлів як в умовах виробництва, так і наступній експлуатації при ремонтах, монтажу, установці.

Для цього, для агрегатів з масою > 15 кг на зовні корпусів передбачається установка такелажних елементів: лап, виступів, закраїн, отворів. У приладобудуванні поширене застосування та установка *рим-болтів* (рис. 7.3) [68].

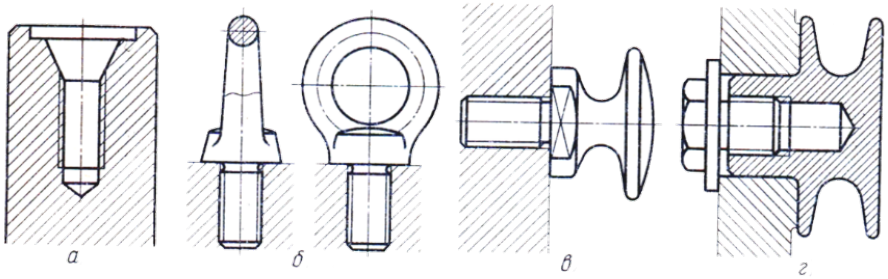


Рис. 7.3. Рим-болти:

а – центрові отвори у валах з різьбовими елементами;
б – кільцеві рим-болти; *в, г* – консольні рими

Циліндричні деталі типу валів підвішують за кільцеві рим-болти (рис. 7.2 *б*), які вкручуються у нарізні отвори (рис. 7.3 *а*), зазвичай об'єднаних з центровими отворами валу. Розміри римів з ряду нормальних (ДСТУ ГОСТ 1434 – 74) вибирають відповідно до ваги виробів. Для бокових установок застосовують циліндричні консольні рими із шийками для стропів та захватів (рис. 7.3, *в, г*). Конструкція (рис. 7.3, *г*) використовується при великих навантаженнях.

Для уникнення аварій з причини обривів римів при такелажу їх розрахунок проводиться з великим запасом міцності.

7.2.2. Ергономічна функція

7.2.2.1. Вступне слово

Ергономіка [гр. *ergos* робота + *nomos* закон] – науково-прикладна дисципліна, яка вивчає трудові процеси з метою створення оптимальних умов праці, що сприяє зростанню її продуктивності з одного боку, а з іншого – зберігає сили, здоров'я і працездатність людини та забезпечує необхідні зручності в ході виконання дій із технічною системою. Прикладна частина ергономіки – це створення ефективних технічних систем, керованих людиною, відповідно до її психічних та фізіологічних можливостей.

Ергономіка – галузь знань, в якій формулюються умови оптимізації стосунків поміж людиною і технікою в процесі їх фізичної взаємодії

Ергономічні вимоги до технічного об'єкта об'єднують питання антропометрії, фізіології, охорони та гігієни праці, інженерної психології. Вони спрямовані на виявлення та ліквідацію джерел втомлювальності в процесі праці, попередженні професійних захворювань, їх класифікацію відповідно до роду діяльності.

Названі вимоги формують *ергономічну функцію* технічної системи.

Ергономічна функція являє собою властивість приладу реалізувати фізичні можливості та здібності людини (вроджені та набуті) відповідно до застосування цього приладу. Для оптимізації застосування прилад розробляється з урахуванням максимального полегшення цього процесу для людини. З іншого

боку, людина за допомогою навчання може пристосовуватися до конкретного приладу. У приладобудуванні перевагу має перший шлях:

прилад створюється для людини.

Отже, ергономічна функція складається з таких окремих функцій:

1) забезпечення безпеки експлуатації;
2) ефективність та зручність експлуатації відповідно до даних антропометрії та ергометрії, на умовах інженерної психології;
3) гігієнічність застосування.

7.2.2.2. Ергономічні навантаження

Зовнішні впливи на людину в процесі взаємодії з технічною системою класифікують за видами навантажень, наведених у таблиці 7.1 [2].

Таблиця 7.1

Ергономічні навантаження[1] зовнішніх впливів і можливості людини, які необхідні для їх сприйняття

Вид навантаження	**Акцепторна сенсорика людини: фізичні, чуттєві, психофізичні реакції**
Фізичні навантаження	Сила, рухливість; можливість розподілення навантажень по різних частинах тіла; майстерність; адаптованість
Навантаження на органи сприйняття: зір, слух, нюх, смак, дотик	Здатність сприймати інтенсивні навантаження; складність і комплексність сприйняття; адаптованість
Психічні навантаження	Здатність до мотивації; адаптованість
Навантаження на увагу	Концентрація уваги; швидкість реакції; адаптованість
Інтелектуальні навантаження	Пам'ять (запас фактів); здатність до програмування (алгоритмізації); здатність до прийняття рішень
Навантаження, зумовлені прагненням до захисту від психофізичних перевантажень	Здатність до стабілізації психофізичного стану

[1] *Кожен із видів навантаження характеризується частотою їх появи і тривалістю*

Бачимо, акцепторна сенсорика людини формує три групи реакцій: фізичні, психічні й реакції органів сприйняття. При цьому проявляються як прямі відповідні,

так і комплексні властивості людини (друга колонка), суто індивідуальні за якістю та глибиною.

Вибір і конструювання засобів, що виконують е*ргономічні* функції, залежать від фізіологічних властивостей людини та умов застосування виробу.

До цих властивостей відносять:

1) антропометричні, що визначаються розмірами частин тіла людини;
2) ергометричні, які визначаються біомеханічним можливостям м'язів;
3) сенсометричні, що залежать від роботи органів сприйняття;
4) психоінформаційні, що характеризують здатність людини сприймати й обробляти інформацію.

Ергономічно зумовлені технічні функції враховуються на всіх етапах життєвого циклу виробу: від постановки завдання на його розробку до рішення про необхідність оновлення продукції. Насамперед необхідно прагнути до забезпечення безпеки праці – *безумовної безпеки,* за рахунок однозначного виконання команд відповідно до функцій, навіть при наявності помилкових дій людини. Навантаження, потрібні для застосування виробу, необхідно знижувати до мінімально можливих, аж до використання складних вартісних технічних рішень, які забезпечать комфортне застосування.

Носіями функцій можуть бути як технічні функції, так і зовнішні фактори, такі як форма, розміри і матеріал, знаки, порядок, алгоритми.

Використання технічного засобу зумовлені геометричними факторами розташування користувача щодо засобу і його контактами з ним, що визначаються *антропометричними* та ергометричними параметрами людини.

Суть перших – це статичні та кінематичні розміри тіла людини (див. табл. 6.3, 6.4); другі – динаміка м'язових зусиль органів (табл.6.9). Перша група визначає процеси підведення та відведення предмета випробування (праці), відомі під поняттям *геометрія робочого процесу*, а друга – робочими зусиллями щодо органів керування. Сукупність наведених факторів об'єднуються поняттям *моторне поле оператора*.

Ці фактори накладають обмеження на геометричні форми технічного об'єкта. Вони визначають форму нового виробу, як правило, ефективніше, ніж технічне обґрунтування форми. Вказаний підхід формування нових типів геометричних форм формують основні асоціації людини вищого порядку.

Серед розлогих проблематик ергономіки наведемо приклад професійного захворювання працівників, які користуються креслярською дошкою як технічним засобом трудового процесу (рис. 7.4) [5]. Для всіх видів названих у таблиці захворювань, показник має найвище середнє значення (46) при горизонтальному положенні стола та при роботі в позі «стоячи». Найменші

показники відзначені для випадків, коли людина працює стоячи (22) або ж сидячи (26) при нахиленій креслярській дошці.

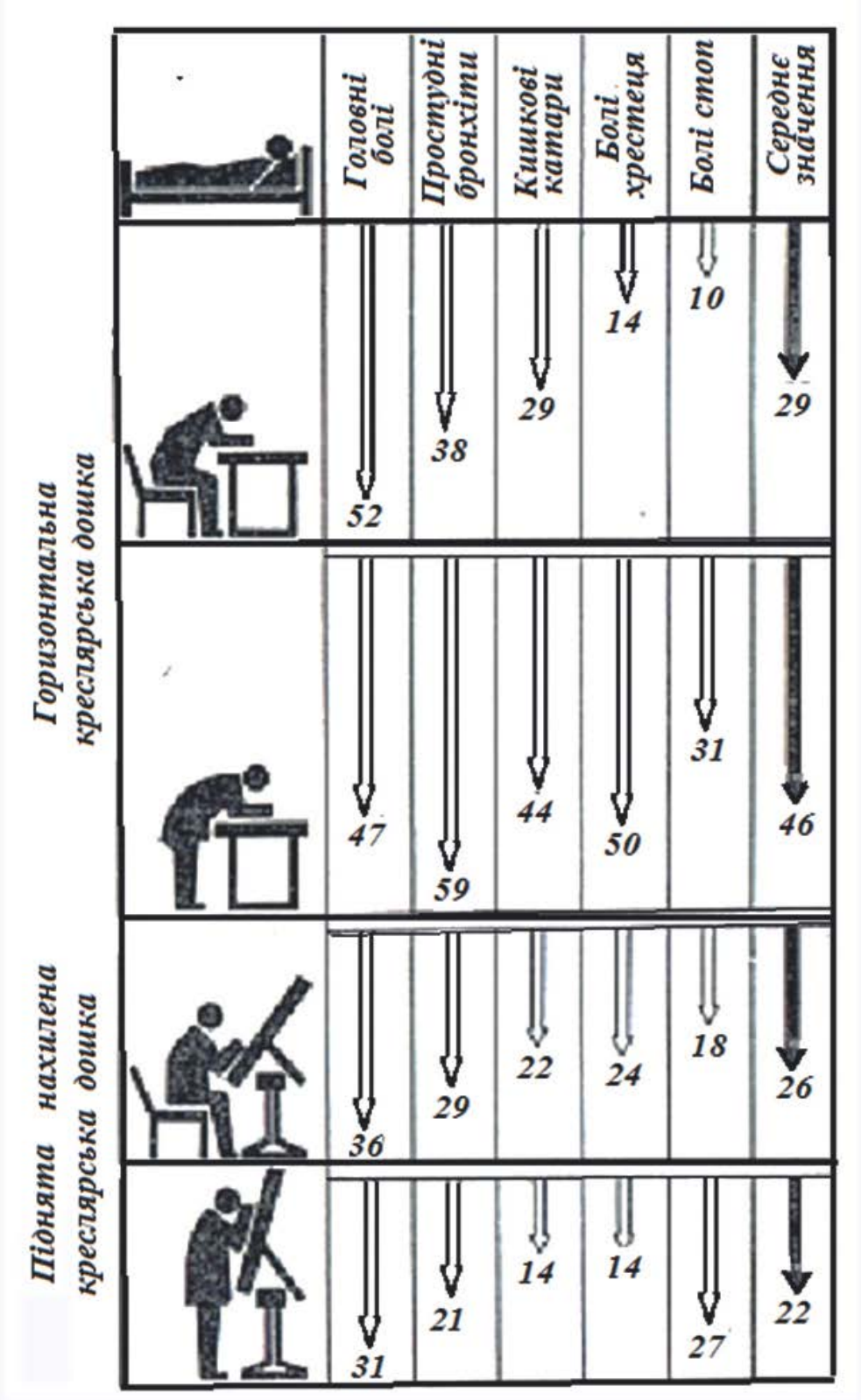


Рис. 7.4. Показники захворюваності осіб, які працюють за креслярською дошкою[1]

[1] Я. Дітріх [5], ст.188,.

7.2.2.3. Питання сумісності технічного засобу та людини

У техногенному суспільстві життя і смерть складає не лише суспільну, але й технічну проблему – на перше місце висувається етичне значення техніки. Кількість технічних засобів, які загрожують життю, і далі зростає; такий стан породив суспільний рух до радикального зменшення ступеня ризику використання технічних систем та мегакомплексів.

Правила, які впорядковують процес розробки ергономічних рішень, виникають на базі загальних природничо наукових знань. Перелік правил:

1) правила призначення розмірів (з урахуванням стандартів) упорядковують розміри засобів праці;
2) правила вибору робочих рухів визначають рухи, необхідні для виконання робочого процесу; частково ці правила мають вигляд технологічних стандартів;
3) правила вибору робочих навантажень зафіксовані здебільшого законодавчо різними документами (статтями) з охорони праці;
4) гігієнічні та кліматичні правила, які також зафіксовані в положеннях з охорони праці.

7.2.3. Естетична функція

Естетика – філософська дисципліна, яка вивчає виразні (зорові) форми об’єктів, які відповідають уявленню про прекрасне або потворне, піднесене чи буденне. Отже, естетичною називають ту якість відношень між людиною (суб’єктом) і виробом (об’єктом), результат яких заснований на розумовому (мисленому) сприйнятті об’єктів споглядання.

Ця якість визначає *симпатію, антипатію* чи *байдужість*, *задоволення* або *огиду*, що одночасно сприймаються «як розумом, так і серцем».

Естетичне сприйняття та умови застосування виробу тісно переплетені між собою. Без достатнього оптимального ергономічного рішення на стадії проєктування та конструювання з наступним техніко-економічним обґрунтуванням часткові *заходи,* спеціально спрямовані на поліпшення естетики виробу, не будуть ефективними.

Естетична функція проявляє властивість виробу при відповідних умовах трансформувати заздалегідь складене або невизначене *естетичне очікуване* враження, або ж точки зору споживача, певний позитивний настрій (позитивний естетичний напрям) стосовно виробу і процесу його застосування. Цей фактор супроводжується розкриттям позитивних емоцій та їх відображенням при застосуванні цього виробу. Сутність виробу в зовнішніх проявах розкриває характерні ознаки, оцінку його цінності. За змістом естетичний фактор характеризується відношенням суб'єкта або групи людей (суспільства) як до окремого об'єкта, так і до їх сукупності (системи)**.**

У техніці естетичний фактор уточняється за допомогою виділення загального, типового і характеристичного у зовнішніх проявах – зовнішніх

властивостях виробу як функції внутрішньої функціональної структури. Ці властивості реалізуються тільки через осмислене сприйняття художньо-конструкторського рішення зовнішньої структури технічної системи.

Очевидно, що якість споглядання визначально залежатиме від духовної культури індивідуума.

Естетична інформація є основним носієм повідомлень, що сприяють отриманню позитивних емоцій. Необхідна умова впливу – попереднє збудження з наступним упорядкування цих емоцій. Перше кореспондується з факторами естетичної оцінки «здатність викликати інтерес» й «сучасність», другий – з факторами «наочність» і «відповідність призначенню». Збудження викликає враження привабливості, упорядкування – залучення до мистецтва.

Естетична оцінка завжди базується на уявленні про ідеальний (наприклад, «прекрасний») об'єкт використання, що знаходиться в деяких відношеннях з людиною при попередній невизначеності очікуваного результату його застосування, а також і невизначеного очікуваного результату сприйняття, яке значною мірою може змінити цю попередню оцінку. Отже, ця оцінка залежить, з одного боку, від суті самого об'єкта, а з іншого – від суб'єкта, у зміст якого включаємо як окремого індивіда, так і суспільство в цілому. Естетична оцінка може бути розбита на окремі фактори, кожен з яких характеризує *принципові параметри* естетичної якості.

До них відносять: *сучасність, здатність викликати інтерес та привабливість, відповідність призначенню, наочність, правдивість і досконалість.*

Досконалість, як зазначалось, є ключовим фактором, всі інші – доповнюють. Якщо виріб не створює враження досконалого, то всі інші фактори його естетичного розв'язку сильно знижуються або взагалі втрачають силу. Досконалість виробу виражається як у якості виконання дій, так і у витонченості його конструкції й форми. Досконалість не є абсолютною величиною, вона залежить від стану розвитку людства в цілому, техніки та технології епохи виробництва зокрема. Досконалість у приладобудуванні відіграє домінуючу роль. *Досконалість* – це такий стан та якість виробу, які не потребують додаткових коментарів або аргументів.

Естетична інформація є основним носієм повідомлень, що сприяють отриманню позитивних емоцій.

7.3. Художньо-конструкторський розв'язок технічної системи

[2, 5, 25, 54, 59–62, 70]

7.3.1. Зміст діяльності

Художньо-конструкторський розв'язок, або спрощено «художнє конструювання» (ХК) – це творчий процес пошуку оптимальної форми виробу та кольорової палітри цієї форми в діалектичному зв'язку зі змістом та якістю виробу. Хоча ці поняття акцентують естетичну сторону виробу, але їх зміст –

це забезпечення у зовнішній структурі триєдиного комплексу конструктивних елементів, які виконують технічні, ергономічні і естетичні функції, об'єднаних удосконаленою діаграмою Вена (рис.7.2). Художнє конструювання формує промислову продукцію підприємств не тільки сучаснішою, економічно, технічно і естетично повноцінною, а й дозволяє отримувати зразки продукції, що володіють новою якістю та високою конкурентоспроможністю на світовому ринку. У промислових виробах має знайти відображення стиль епохи, тенденції розвитку виробничих сил та суспільства в цілому. На сьогодні кордонів виробництва практично не існує, оскільки сучасний виріб скомпонований кращими зразками елементної бази від світових виробників.

Бренд автопромисловості – автомобіль «Ройлс-Ройс»: кузов виготовлений у Німеччині, а виробництво основних агрегатів та складання – у Англії.

Результатом системного застосування понять та методів *ХК* визначається додаткова *мета* конструювання – це отримання нової концепції виробу, який володіє новою споживчою вартістю. Ці нові якості, об'єднані триєдиними функціями зовнішньої структури, в подальшому формулюються тільки у взаємній залежності. Процес реалізації названого і буде художньо-конструкторським розв'язком (*ХКР)* технічної системи відповідно до спеціального комплексу положень, понять та методів.

Загальна *задача ХКР* – включити виріб у систему «виріб – людина – середовище»

Мета ХКР – створення такого глибоко гуманізованого світу речей, в якому людина могла б удосконалювати свої можливості. Як зазначалося, досконалий виріб гармонійно поєднує високі технічні та естетичні якості.

Результат ХКР – це зовнішня геометрична структура *(ЗГС)* виробу.

В *ХКР* поширені два види доведення зовнішності виробу до завершеності – *геометричне* – об'ємне проєктування (або *скульптурне*) й *функціональне*. Матеріальна реалізація *ХКР* розпочинається з об'ємного проєктування – макетування та моделювання, основний результат яких – це макет, що зовні не відрізняється від виробу, отриманого промисловим способом. На відміну від креслень, малюнків, схем і різних описів, макет спрощує процес формоутворення виробу, дає повне зорове уявлення про створюваний виріб. Відкриваються можливості проведення аналізу різних варіантів композиційного рішення як окремих вузлів, так і всього виробу, який можна розглядати з різних напрямів, змінюючи позицію спостерігача.

ХКР здійснюється командно, групою спеціалістів різних професій. Центральною фігурою у команді є *художник-конструктор (дизайнер)*. Зміст та результат роботи *художника-конструктора* поданий у табл. 1.5 (вступна частина).

Фахівці з художнього конструювання і конструктори повинні обов'язково залучати до цієї роботи фахівців, що займаються питаннями виробничої медицини, інженерної психології, економістів та соціологів. *Художник-конструктор* – людина, що використовує та втілює творчі принципи технічної естетики у виріб методами художнього конструювання. Сфера діяльності

художника-конструктора охоплює у наш час практично всі створювані людиною предмети, особливо виготовлені засобами масового виробництва, які приводяться в дію механічним способом. Ця діяльність поширюється на довговічні споруди та об'єкти цивільного будівництва. Безсумнівно, сфера діяльності художника-конструктора буде змінюватися разом із прогресом промисловості та вдосконаленням професії художника-конструктора. Робота художника-конструктора описується як у термінах інженерно-технічної, так і художньої діяльності. Результатом діяльності художника-конструктора може бути проєкт у графічній формі або у вигляді об'ємного макету, або діючої моделі. Ця модель, безумовно, є метою всієї його діяльності при реалізації проєкту. Створюється деякий комплекс матеріальних структур – службові структури, за допомогою яких людина здійснює різні речовинно-енергетичні перетворення й організовує зовнішнє довкілля відповідно до своїх потреб. Інколи художник-конструктор проєктує засоби знакової комунікації (надписи, умовні позначки, пластичні та кольорові форми), які використовуються як інструкції для службових структур. Ці засоби знакової комунікації також можна назвати службовими. З наведеного випливає, що технічний дизайн не можна ототожнювати з діяльністю художника в галузі образотворчого мистецтва, де продуктом є об'єкти, що виконують тільки комунікативну функцію.

*7.3.2. З***асоби х***удожньо-конструкторських рішень*

По-перше, сприйняття художньо-конструкторських рішень щодо виробу та його загальне сприйняття нерозривні. По-друге, при зовнішньому спогляданні людиною довільного об’єкта всі органи діють сумісно.

Елементи сприйняття, що забезпечують отримання позитивних емоцій, необхідно вибирати і формулювати з урахуванням законів або факторів формоутворення так, щоб можна було б гарантувати необхідний вплив та дію на сприйняття споживачем і отримати планові естетичні властивості виробу, які реалізуються у його *естетичній формі*, під якою розуміють геометричні контури (форма виробу), якість поверхонь споглядання, їх кольорову палітру та контраст геометрії та кольору.

Отже*, засоби впливу на відчуття* в практиці художньо-конструкторських рішень зовнішньої геометричної структури виробу такі:

1) *форма виробу – геометричні контури виробу;*
2) *якість та текстура поверхонь споглядання (макро- та мікро-геометрія);*
3) *кольорова палітра*;
4) *контраст* геометричних елементів форми, світла та кольору.

Інтегральне сприйняття зовнішньої геометрії виробу здійснюється через *структурні елементи*, до складу яких відносять: *точки, лінії, поверхні, тіла, колір та кольоровий контраст.*

Лінії (точки, плями, стрічки) матеріально проявляються у вигляді стикувань окремих поверхонь, ребр, канавок, а також елементів штучних членувань: нанесених ліній, вдавлених канавок, границі тіней та плям.

Поверхні – елементи форми, які характеризуються покриваючою дією, утворюються обмежувальними лініями. Напрям протяжності і співвідношення сторін є основним фактором контрасту при зоровому сприйнятті поверхні. Графічне членування, стикування, варіації кольорів окремих поверхонь, просторова структуризація (рельєф) можуть виявляти вирішальний вплив на сприйняття форми об'єкта. Дуже блискуча поверхня більше привертає увагу, ніж матово-глянцева, що може викликати зорове спотворення форми. Отже, членування форми – дієвий спосіб зорових вражень. Сприйняття поверхні залежить від освітлення оточення і максимального контрасту із суміжними поверхнями.

Якість поверхні: мікрогеометрія (гладкість, шорсткість), фізико-хімічні та декоративні властивості.

Текстура поверхні: поверхневий прояв внутрішньої структури.

Фактура поверхні: рельєф, рифлення тощо.

7.3.3. Форма виробів

7.3.3.1. Загальні положення

Зовнішній вигляд приладів характеризується формами, які свідчать про досконалість конструкції та якість елементів зв'язку в системі *«людина-техніка-довкілля»,* а також оптимальними розмірами. Вдало обрана форма, по-перше, *облагороджує* виріб, по-друге, *відображає високий ступінь його технічної й «інтелектуальної» досконалості* завдяки завершеності техніко-естетичних рішень; саме завдяки формі ця довершеність впадає в очі.

В *ХК* та інженерній психології користуються таким поняттям форми:

форма є способом і засобом вираження ступеня відповідності функціональної сутності виробу психофізіологічним, антропометричним та ергометричним можливостям і потребам людини. Форми основних частин виробу мають бути простими, лаконічними, з природними контурами (обрисами), без мудрованих конфігурацій, оскільки різка зміна основного контуру мимоволі притягує погляд людини і відволікатиме від основних дій: буде постійними зонами зорової концентрації, що має назву «*візуальний шум»*.

Для розробки виробів зазвичай необхідне знання умов його експлуатації, розмірів робочого місця, методів роботи, обсягу та умов передачі інформації. Оскільки ці вимоги не завжди здійсненні, з ергономічної точки зору, оптимальну форму виробу можна знайти не у всіх випадках. Розробка кожного приладу повинна супроводжуватися дослідженнями всього процесу його майбутньої експлуатації, що дозволить одержати необхідні ергономічні рішення. Отже, *ергономіка* формує природничо-наукову основу для вибору форми виробу.

Оптимальні пропорції сторін форми об'єкта мають вписуватись у куб або ж у прямокутник із «золотими сторонами», які визначені числами Фібоначчі.

Оптимальним техніко-конструктивним рішенням при виборі форми виробу необхідно вважати рішення за принципом мінімізації цієї форми.

7.3.3.2. Сприйняття людиною зовнішньої геометричної форми

Із самого початку розробки виробу процес встановлення форми полягає у виявленні взаємозв'язків усіх величин, які проявляються через ергономічні та естетичні реакції людини з урахуванням технічних потреб зовнішньої елементної бази технічної системи та факторів навколишнього середовища. Тому вибір зовнішньої форми починається з моменту постановки завдання конструювання виробу і закінчується оцінкою досвіду його експлуатації.

Щодо сприйняття інформації, то важливий наступний тезис. На сьогодні щільність та швидкість надходження інформації до споживача набагато перевищує можливість її використання цим споживачем. Унаслідок цього інформація втрачається, і тільки деяка її частина, за відповідними критеріями, сприймається споживачем. При можливих варіантах споживач інтуїтивно йде по спрощеному шляху сприйняття, тому ланцюг збудження має бути побудований за принципом оптимальної доцільності проходження інформації, що забезпечить необхідний для сприйняття рівень збудження.

7.3.3.3. Закон Вебера – Фехнера (збудження – відчуття – сприйняття)

Закон Вебера–Фехнера є основним психофізіологічним законом, що встановлює зв’язок між фактором збудження середньої сили та викликаними цим фактором відчуттями (рефлексій). Відповідно до цього закону, інтенсивність рефлексій пропорційна натуральному логарифму сили збудження. Більш зрозумілим буде таке тлумачення: якщо сила збудження зростає в геометричній прогресії, то інтенсивність відчуття нарощується в арифметичній прогресії. Цей закон справедливий для всіх типів рефлексій за нормальних умов, під якими розуміють, що збуджуюча сила знаходиться в межах, починаючи від нижнього порогу відчуття, менше якого збудження ще не сприймається, до порогу насичення, вище якого збудження вже не викликають стійких реакцій або ж наступають больові реакції.

7.3.3.4. Закон привабливої візуальної форми

Сприйняття форми забезпечується одночасно комплексом рецепторів, до яких віднесемо як зорові, так і тактильні. Останні особливо важливі для людей з обмеженими властивостями по зору, хоча їх актуальність загальна з антропометричної точки зору. Внаслідок цього, оптимальна форма виробу сприймається цілісно.

Властивості форми поділяють на:

1) структурні, 2) граничні, 3) інформативні.

Структурні: просторові геометричні контури та їх членування, розподіл маси, матеріал виготовлення, розподіл яскравості та забарвлення.

Граничні: форма зовнішніх поверхонь, стан їх мікрогеометрії, зоровий (прозорість) та фізичний доступ до внутрішньої структури.

Інформативні: у зовнішній формі має проявлятися внутрішня структура. Форма має нести інформацію про функціональне призначення виробу та потребу виконання операцій керування, небезпеки для довкілля при використанні виробу.

7.3.3.5. Закон одночасності

Усі елементи впливу об’єкта на людину діють одночасно різними способами та при змінному фоні. Взаємозв’язок окремих законів формоутворення визначений як закон одночасності: «*закони формоутворення являють собою одне нерозривне та нероздільне ціле, і справедливість кожного окремого постулату обмежується справедливістю решти.* Той, хто вихопить із цього взаємозв’язку одну вимогу і забезпечить її безумовне верховенство, *перетворить її зміст у беззмістов’я*».

До прикладу, зображення, відомі як оптичні ілюзії (оптичний обман), при зміні умов спостереження можуть проявлятись як обернена картина. Або ж несприятливі умови можуть спотворювати картину спостереження, що в деяких випадках свідомо використовують для досягнення наперед поставленої мети.

7.3.3.6. Формоутворення виробів

Форма – це зовнішня просторова геометрія тіла виробу. Промисловий підхід до виготовлення довільного об’єкта – стилізація технологічного процесу. Можливі три підходи до виготовлення тіла виробу.

Перший, найпростіший: тіло обмежене площинами. Це куб, прямокутна призма, многогранник. Ці фігури краще серед інших виявляють форму, створюють враження впорядкованості, членованості окремих поверхонь. У випадку групового розташування приладів можлива установка лицевих панелей в одній площині або ж у паралельних, формується відчуття взаємозв’язку, врівноваженості та гармонії. Многогранні фігури більші за об’ємом, візуально сприймаються як викривлені. Чим більша кількість обмежувальних площин, тим більше викривлення. Особливий акцент на грані фігур. Гострі грані візуально збільшують об’єм фігур, сприймаються негативно як незграбні; їх округлення робить фігуру довершеною, асоціативно меншого об’єму.

Другий. Тіла, обмежені неплоскими поверхнями. Яскравий приклад – транспортні засоби (авто, літак тощо). Відсутність граней надає цим фігурам властивостей «пластичності»: ефект зорового об’єднання окремих частин тіла, зменшення його розмірів. Асоціативно такі фігури володіють властивостями «об’ємності», охоплення, обтягування. Їх сприйняття понижується при збільшенні членування контурів, оскільки при цьому не виникають асоціації, пов’язані з конкретизацією форми виробу – невизначеність геометрії фігури. Використання таких тіл особливо доцільне при формоутворенні просторово урівноважених фігур.

Третій, комбінація першого і другого. За таким принципом можна досягнути високої гармонійності та естетичності форми з одного боку, а з іншого – конструктивно-функціональної досконалості. Наприклад, лицева панель – плоска, а інші – фасонні, відповідно до геометрії оточення та функціональних потреб. Приклад – монітор телевізора.

При компоновці елементів поверхні технічних виробів в одне ціле часто виникає необхідність об’єднувати різні за формою та розмірам частини. При цьому можливі два варіанти.

1. Окремі частини розчленовані конструктивно, підлягають спряженню роз'ємним сполученням. Перевага такого принципу полягає в можливості членування форми на конструктивні та функціональні вузли; спрощена конструкторська підготовка виробництва, адже доведення конструкторської документації проводиться в процесі виготовлення аж до необхідного рівня.. Недолік – багатоформність та багатогранність, відчуття неврівноваженості конструкції, наявність внутрішніх западин, де збирається пил та бруд.

2. Виріб, за формою виготовлений як одне ціле; кількість частин, які складають цю форму, зведена до мінімуму. Частини з'єднані в одне ціле плавними переходами; перевагами таких виробів є їх гармонійна досконалість та зорова єдність.

Пропонуємо самостійно провести аналіз графічних образів зовнішньої структури об'єктів на вибір з використанням вищеназваних варіантів.

7.3.3.7. Засоби та способи впорядкування форми

Мета впорядкування – доведення форми до естетичної та функціональної досконалості. З цієї причини формоутворення є вирішальним етапом в процесі художньо-конструкторського розв'язку виробу.

Основними засобами впорядкування форми є: *членування, спрощення, урівноваження та уніфікація* її частин.

Членування дозволяє спростити конструкторське та технологічне впорядкування, що забезпечить спрощення в користуванні виробом – *семантичний* аспект впорядкування.

Спрощення, метою якого є технологічний аспект з одного боку, а з іншого – експлуатаційна доступність; це *прагматична* мета впорядкування. Засоби спрощення: *об'єднання, вирівнювання, згладжування*.

Урівноваження. Всі елементи форми мають бути врівноважені один відносно одного та форми в цілому. Врівноваження стосується як зорового споглядання, так і розподілу маси виробу. Отже, при всьому розмаїтті елементів необхідно забезпечити зорову гармонію сприйняття, а центр ваги має збігатися з геометричним центром виробу. Візуальна рівновага з асоціативними реакціями є основним засобом загальної рівноваги. Вона досягається тоді, коли не виникає почуття в необхідності доповнень або змін.

Прекрасне – це така привабливість споглядального стану об'єктів, яка не потребує додаткових аргументів.

Уніфікація – процедура обмежень номенклатури, розмірів, параметрів, які знаходять свій прояв у нормативних актах.

Щодо уніфікації форми, то можливі такі способи зміни розмірів об'єктів: *схожість, пропорціювання, споріднення*. *Схожість форм* забезпечується функціональними ознаками; наприклад, мікроскопи (наявність предметного столика, стійки, тубуса, окуляра). *Пропорціювання* – зміна розмірів об'єктів пропорційно зміні основних параметрів за деяким законом (див. рис. 7.9, додаток 1) або за правилом «золотих пропорцій» (рис. 7.4, 7.5). *Споріднення* сутності форми виливається у використання в об'єктах різного призначення

конструктивних елементів з однаковими або ж тотожними ознаками, які викликають рівнозначні асоціації.

Асоціації – психологічно зумовлені уявлення людини, які виникають на основі визначених властивостей відомих об'єктів: форми, кольору, запаху, тактильних ознак. На практиці їх свідомо використовують для досягнення необхідної мети. Логіка зовнішньої форми приладу має достовірно відображати інформацію про його призначення та принцип дії, забезпечивши *єдність форми та змісту*. Невдала форма може викликати «ворожі» щодо виробу асоціації, які формуватимуть психологічну відразу, що негативно вплине на просування приладу до споживача. Асоціативний вплив форми має проходити перевірку на моделі або макеті; в разі проблем у сприйнятті використовують геометричні елементи членування та кольорові аплікації, які нейтралізують невдалу форму.

Отже, форма виробу має бути виразником однозначності призначення, а розташування органів керування – однозначно відображати функціональну суть.

Схематична демонстрація процесу та процедур уніфікації та типізації показана на рис. 7.5 [5].

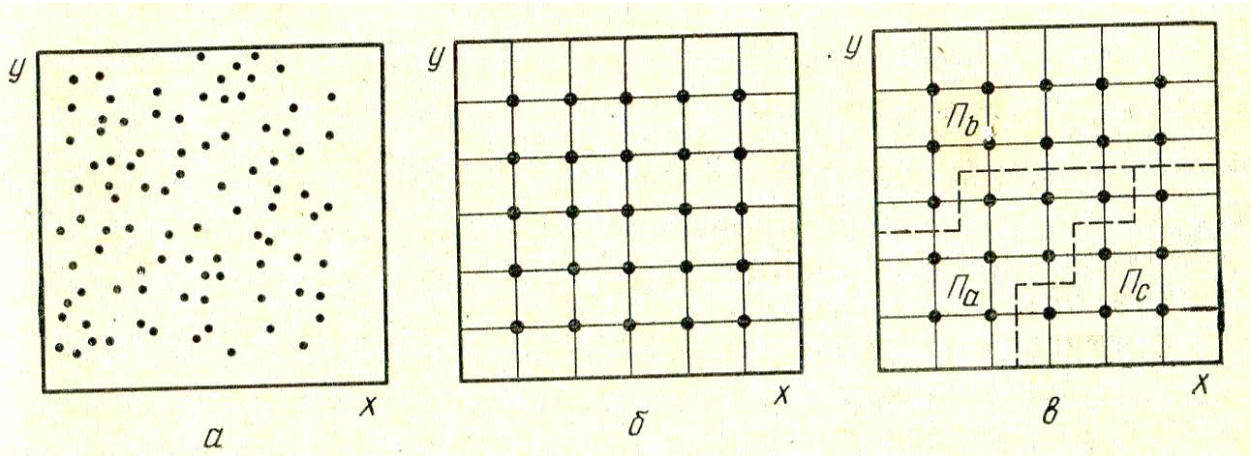


Рис.7.5. Приклад виконання процесу уніфікації та типізації:
а – масив деяких параметрів, які підлягають впорядкуванню та обмеженні; б – процедура обмеження масиву за деяким законом: вибір значень у вузлах сітки; в – типізація властивостей об'єктів шляхом їх групування ($П_a$, $П_b$, $П_c$) за функціональними властивостями та обмеження дії

7.3.3.8. Вибір форм об'єднаної сукупності приладів

Розробка системи приладів вимагає від виробника не оптимальної специфічної форми одного приладу або приладів одного ряду, а оптимуму форми всієї системи. Незалежно один від одного, нові вироби будь-якими колективами дизайнерів мають розроблятися єдино і обов'язково з високою якістю до будь-якого моменту часу і для будь-якого місця. При цьому повинні враховуватися сучасні й перспективні потреби в цих виробах і способи їх виготовлення. За основу мають бути встановлені довготривало діючі параметри

системи, які мають забезпечувати її динамічне розширення за рахунок новостворених елементів і приладів. Спеціально для зовнішнього оформлення виробів розробляються параметри естетичного спряження, що забезпечують отримання таких комбінацій елементів систем, які створюють єдине враження від елементів, розроблених в різний час і в різних місцях.

Для тривалого збереження сучасності виріб повинен займати нейтральну позицію щодо моди.

Усі запропоновані елементи форми повинні сприйматися так, щоб будь-яка їх комбінація (але доцільна) давала пропорційне, гармонійно пов’язане і технічно ефективне рішення [2] (рис. 7.6).



Рис. 7.6. Приклади невдалого (а) і гармонійного вибору форми системи приладів (б)

При невдалому виборі форми створюються додаткові психофізичні навантаження, що ускладнює сприйняття наявного розмаїття форм. Чіткість форм і плавність ліній, за якими сприймається система, понижують психологічну напругу.

7.3.4. Інструменти художньо-конструкторських рішень

Інструментами ХК є *композиція та компонування.* Застосовуючи їх, ми створюємо позитивні емоції, спрощуємо процедуру сприйняття інформації людиною, поліпшуємо концентрацію і перемикання уваги, підвищуємо швидкість і точність дій.

7.3.4.1. Композиція

Являє собою процес поєднання елементів зовнішньої форми виробу, результат якого – це побудова цілісного витвору, всі елементи якого знаходяться *у взаємозв'язку і гармонійній єдності*. Композиційна організація форми виробу досягається встановленням взаємозв’язків і підпорядкуванням складових елементів, які необхідно розділити на головні та підпорядковані; останні, взаємно підсилюючи один одного, утворюють єдине ціле. Якщо форма виробу неоднорідна, розміри елементів відрізняються, то основу композиції буде складати об’ємно-просторова структура, що відповідає призначенню та конструкції виробу.

Отже, *композиція* – це процедура надання формі виробу *функціональних властивостей*, по-перше, а по-друге – надання *гармонійної досконалості.*

Засобами та ознаками досконалої композиції зовнішньої форми є:

а) тектонічність;
б) пропорція і пропорційність;
в) масштаб і масштабність;
г) ритмічність і метр;
д) симетрія і асиметрія;
е) контраст, нюанс;
є) статичність і динамічність.

Тектонічність із конструкторської точки зору – це властивість зовнішньої структури виробу відображати власну внутрішню матеріально-фізичну природу, яка проявляє, так би мовити, характер конструкції і всю складну внутрішню силову роботу матеріалу для забезпечення стабільності зовнішньої структури. Досконала конструкція володіє такими властивостями:

надійність, міцність, стійкість та рівновага.

Аналіз конструкції на тектонічність полягає у виявленні розподілу основних мас виробу, напрямів силових потоків та напружень окремих його частини, тобто як матеріал виробу чинить опір зовнішнім навантаженням (деформації та їх види). До того ж тектонічність форми означає наочність того, з якого основного матеріалу виконана конструкція (метал, дерево чи пластмаса), та як ця конструкція виготовлена – монолітне масивне лиття чи це легкий тонкостінний корпус або ж складальна рамна конструкція (клепана, зварна, інше).

Тектоніку називають *зрілим відображенням у формі* конструкції *організацію* матеріалів. Отже*, тектонічність* – це специфічний засіб художнього вираження об'ємно-просторової структури, є важливою категорією композиції і закладає основу побудови досконалої форми виробу.

Пропорція і пропорційність. *Пропорція* – один із головних засобів, який застосовують в мистецтві, архітектурі, художньому конструюванні техніки; визначає співвідношення окремих частин предметів між собою. Правильне встановлення пропорцій в єдності складає пропорційно-гармонійний лад, його порушення знижує художню виразність.

Пропорційність. Існують різні види пропорційності. Так, для утворення простої арифметичної пропорції потрібно чотири члени: a : b = c : d. Геометрична пропорція складається з трьох елементів: a : b = b : c. Загальний член b називають середнім пропорційним. Крім арифметичної і геометричної, існують також пропорційні залежності, що об'єднані загальною назвою – гармонійні пропорції, які утворюється при комбінації тільки двох величин a і b. Поділ цілого на дві нерівні частини у співвідношеннях a : b = b : (a + b); ця рівність створюється комбінацією лише двох величин, до того ж відношення між ними незмінне. Особливе застосування має поділ деякого відрізка *a* у співвідношеннях 0,382 та 0,618; бачимо, що 0,382 + 0,618 = 1.

В математиці такий поділ названий золотим перетином, який побудований на базі чисел Фібоначчі – італійський математик XII-XIII.

Леонардо Фібоначчі (Леона́рдо Піза́нський (лат. Leonardus Pisanus, італ. Leonardo Pisano) **–** один із кращих математиків свого часу (період життя: близько 1170 року – біля 1250 року), який почерпнув базові знання від стародавніх єгипетських, грецьких і арабських математиків, систематизував їх в своїй основній праці "Книга розрахунків" ("Liber Abaci"), яка містила в собі цілу низку нових для європейців ідей, однією із найбільш видатних були арабські цифри.

Числа Фібоначчі – елементи числової понеобхідноовності 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, …, (і далі), в якій кожне наступне число дорівнює сумі двох попередніх. Розділивши будь-яке достатньо віддалене від початку число на число, яке передує йому, наприклад, 89/55, отримаємо ірраціональне число 1,618181818181818…; на практиці використовується число **1.618**.

Число 0 не розглядається як член послідовності.

Золотий перетин виражається також геометричним способом, за допомогою прямокутного трикутника з відношенням катетів 1:2 (рис. 7.7).

У прямому напрямку ряд золотого перетину виражається такими цифрами: 0,09; 0,146; 0,236; 0,382; 0,618; 1,000; 1,618; 2,618 і далі, сумуючи два останніх членів ряду. У зворотному напрямку M_2 ділиться на $M_3 = 0{,}236$; $M_4 = 0{,}146$; $M_5 = 0{,}09$ і далі, використовуючи операцію «віднімання».

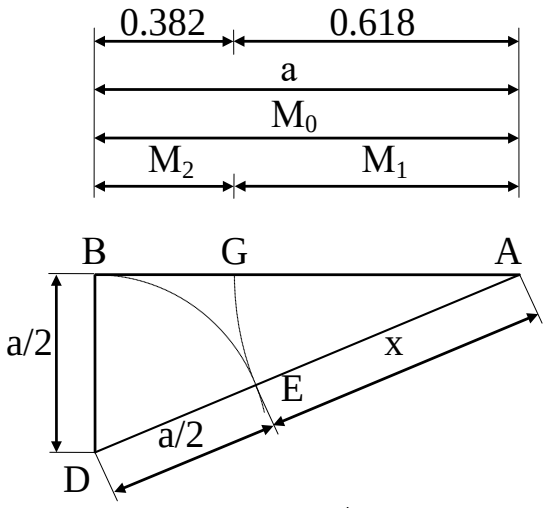


Рис. 7.7. Графічна побудова золотого перетину:
$M_0 = a = 1{,}0$;
$M_1 = x = 0{,}61803398$;
$M_2 = a - x = 0{,}381966$.

Ще один спосіб гармонізації плоских і просторових поверхонь прямокутної форми демонструється рис. 7.8. Їх отримують геометричним способом за Піфагором, беручи за вихідну форму *квадрат*.

Отже, *пропорції* виражають співрозмірність частин геометричної форми виробу поміж собою та з цілим; виступають засобом гармонізації форми і впорядкування основних параметрів виробів.

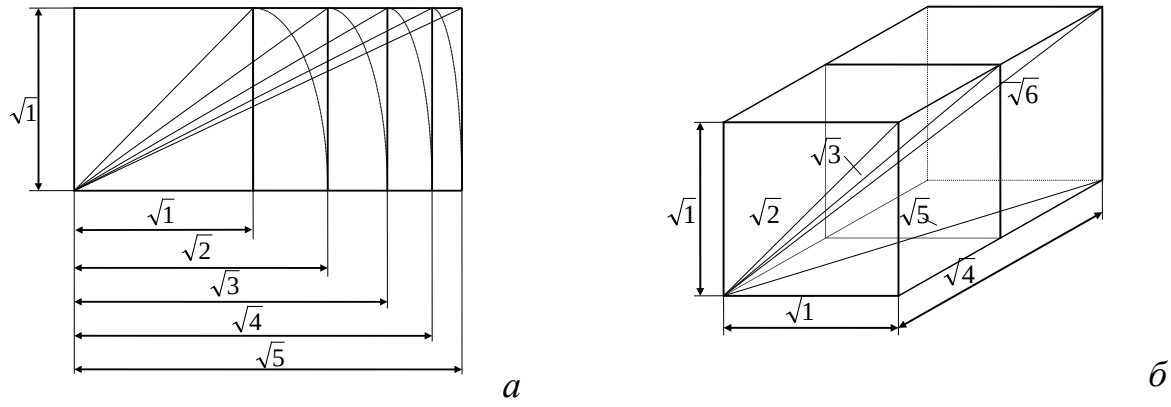


Рис. 7.8. Побудова гармонійних прямокутних форм від квадрата до прямокутника (а) та від куба до паралелепіпеда (б)

Масштаб і масштабність. *Масштаб* – міра відповідності одного предмета іншому або декільком при їх зіставленні; інакше – це відношення лінійних розмірів об'єкта на кресленні, карті, до його розміру в натурі. Щодо креслень, перевага надається масштабу 1:1. Масштаби зменшення: 1:2; 1:2,5; 1:4, 1:5, 1:10 і далі. Масштаб збільшення – 2:1; 2,5:1; 4:1 5:1, 10:1 і далі, відповідно до стандарту.

Масштабність – складніше поняття; в загальному це співвідношення геометричних розмірів виробу до наперед встановленої (замовником або суспільним договором) *міри*. В архітектурі це один із композиційних засобів, який виражає розмірність чи відносну відповідність розмірів форм архітектурного витвору, що сприймаються людиною, до *розмірів людини*.

Метричність і ритмічність. У художньому конструюванні, як і в архітектурі, використовується специфічний засіб композиції – закономірне повторення або чергування елементів. Існують два види повторюваності – *метрична і ритмічна*. Метричний ряд є простим видом повторювання, якщо він побудований з одного елемента, або складним, якщо в композиції одночасно бере участь кілька елементів (або рядів) метричної повторювальності.

Ритм – це вид повторювання, понеобхідноовне чергування співрозмірних елементів форми споруди, виробничого обладнання, окремого виробу, шляхом їх повтору, чергування, нарощування чи спадання їх кількості, форми, розмірів. Ритмічні ряди можуть бути спадаючими або зростаючими, контрастними чи нюансними. Цей засіб надає чіткості і стрункості художньому виробу, робить його більш цільним і виразнішим. Розрізняють ритмічні ряди, створені чергуванням виразніших елементів, що називаються *акцентами,* та менш виразнимх (пасивних), які називають *інтервалами*.

Симетрія і асиметрія. *Симетрія* – принцип організації елементів композиції, заснований на упорядкованому їх розташуванні навколо центру, осі, площини, що забезпечує гармонію в сприйнятті виробу. Симетрія –

особливий рід геометричної закономірності краси форм предметів, які створюють гармонії.

Симетричною називається фігура, яка складена з геометрично рівних частин, які певним чином розташовані відносно один одного.

Існують три основних види симетрії: *дзеркальна, осьова, гвинтова*. *Дзеркальна* симетрія заснована на рівності двох частин фігури, розташованих одна відносно іншої, як предмет і його відображення в дзеркалі. *Осьова* симетрія зумовлена рівністю геометричних фігур в осьових перетинах і досягається обертанням фігури відносно осі симетрії. *Гвинтова* симетрія досягається в результаті обертального руху лінії чи площини навколо нерухомої осі з постійною кутовою швидкістю і одночасно поступальним рухом вздовж осі.

Симетрична побудова не завжди узгоджується з суперечливими вимогами при компонуванні того чи іншого приладу, споруди тощо. Тому в деяких випадках особливе значення набуває *поняття асиметричної композиції.*

Асиметрія виділяє деякий елемент або їх групу окремо, органічно пов'язує ці елементи між собою, поєднуючи їх в цілісні, функціонально-гармонійні системи й надаючи їм верховенства у сприйнятті.

Контраст, нюанс. *Контраст* – засіб композиції, що використовується для вираження, протиставлення елементів за формою, розмірами, кольором і сприяє загостренню сприйняття цілого. *Нюанс* – засіб композиції, протилежний контрасту, що означає незначну відмінність структурних елементів за вищевказаними ознаками.

Статичність і динамічність. Окрім симетрії і асиметрії, розрізняють також *статичне* і *динамічне* поняття композиції. Будь-яка фігура, що має центр чи вісь симетрії, завжди статична відносно них. До прикладу, с*фера і куб статичні у всіх напрямках.* А *конус* статичний відносно радіальної симетрії, а вздовж неї він динамічний, бо відбувається зміна форми. Найбільш характерну динамічну композицію форми мають предмети, що рухаються, – транспортні засоби.

6.3.5.2. Компонування

Компонування **–** це поєднання елементів (вузлів) конструкції, що забезпечує насамперед її функціональність. Ця процедура стосується як зовнішнього геометричного вигляду, так і внутрішнього наповнення елементною базою. Результат зовнішнього компонування знайде свій прояв у зовнішній геометричній структурі – зовнішньому вигляді, зокрема. у зовнішній формі виробу.

7.3.5. Кольоровий чинник у зовнішній структурі виробу

7.3.5.1. Загальна інформація

Важливим фактором дизайну зовнішньої форми виробів, що визначає його як ергономічний, так і естетичний рівень, став колір. Він використовується з урахуванням досягнень наук (фізіології, психології, естетики) і досвіду

мистецтва. Досвід мистецтва декларує, що колір, форма та призначення предмета нероздільні; колір може як поліпшити, так і погіршити естетичні та функціональні якості предмета. Колір і ритм – визначальні, що організовують початок конструктивного простору. Естетична виразність цеху, приміщення для відпочинку включає в себе і освітленість, і колірне рішення стін, стель, верстатів, і ритм розстановки обладнання.

Ще Гьоте спостеріг, що різні кольори породжують особливий душевний настрій, а саме: жовтий колір викликає радість, синій навіває сум, зелений заспокоює, умиротворяє. Дійсно, кольорова палітра предмета чинить на людину великий психологічний вплив. Якось один англійський фабрикант пофарбував свої цехи в "немаркий" чорний колір – це породило епідемію нервових захворювань у працівників. На заводі в Чикаго робочі відмовилися обідати в новому кафетерії: сяюче білизною приміщення нагадувало лікарню. Кабіни літаків виявилося нераціонально фарбувати в "радісний", сонячне жовтий колір, адже останній погіршує роботу вестибулярного апарата, що загойдує пасажирів. Для гарячих цехів більш доцільні не червоний, оранжевий та інші «теплі» тони, а холодні голубий та зелений; вони поліпшують фізичний стан людини і підвищують її працездатність.

У наш час питання колористичного рішення виробничих, культурно-побутових інтер’єрів почали розв’язуватися комплексно. Система "людина – колір – простір" осмислюється в цілості єдиного світу. Колір починає розглядатися в поєднанні зі звуком, освітленням, повітрям, формою як найважливіший елемент психологічного клімату на виробництві. При цьому враховуються психологія і фізіологія сприйняття кольору, його зв’язок із функцією предмета, технологічні особливості процесу виробництва.

Сучасні судження вчених, художників про психофізіологічний вплив кольору на людину зведені у табл. 7.2.

7.3.5.2. Властивості та особливості дії кольору

Дослідження в області інженерної психології показують, що правильно обране забарвлення виробу не тільки поліпшує його естетичне сприйняття, але й підвищує продуктивність праці людини-оператора. Одним із сучасних способів оформлення виробів є використання різних відтінків одного кольору, а часом й контрастні кольори. Причому, кількість контрастів різного типу має зменшуватися до мінімуму, ще достатнього для необхідного членування форми. Варто понижувати колірні контрасти, особливо контрасти блискоти. Кольорова палітра довільного об’єкта викликає як позитивні, так і негативні емоції, несе знакову інформацію про властивості виробу, його призначення та умови застосування. Колір – це властивість тіл викликати особливі зорові відчуття відповідно до спектрального складу відбитого чи випускаючого видимого випромінювання. Всі кольори розподілені на дві групи: *ахроматичні і хроматичні*.

До ахроматичної відносяться білі, чорні і всі сірі кольори, починаючи з найсвітлішого і закінчуючи найтемнішим (див. табл.7.2).

До хроматичної групи, належать всі спектральні кольори – червоні, оранжеві, жовті, зелені, блакитні, сині, фіолетові, коричневі, пурпурні з усіма переходами й відтінками між ними.

Відповідно до таблиці, людині властиві чотири канали сприйняття кольорів:

1) сенсорний,
2) фізіологічний,
3) психологічний,
4) асоціативно-просторовий.

З табличної інформації як узагальненому досвіду фахівців важко віддати перевагу одному з названих каналів, адже відсутні критерії дії і їх розмежування. Одначе, можна висловити таке. Колір може викликати почуття теплоти або холоду, бадьорості або втоми, легкості чи важкості, розширювати або звужувати простір, стимулювати зір, мозок, нерви; може сприяти та допомагати лікуванню хворих.

Таблиця 7.2

Судження вчених, художників про психофізіологічний вплив кольору на людину

Хроматичні кольори				
Колір/дія	**Сенсорна**	**Фізіологічна**	**Психологічна**	**Асоціативно-просторова**
Червоний *Яскраво-червоний*, рекламний; *Червоно-бурий*: (для приміщень)	Колір крові, привернення уваги; урочистий; яскравий, гарячий; солодкуватий смак	Сприяє збільшенню м'язової напруги, підвищенню кров'яного тиску і ритму дихання	Активізуюча, енергійна і життєрадісна	Дуже голосно, крикливо; поле зору наближує
Оранжевий	Теплий; смак солодко-кислого	Сприяє поліпшенню травлення, прискорює течію крові.	Активізуюча, викликає радість	Гучно, пронизливо; наближує
Жовтий	Враження тепла; смак кислого	Стимулює зір, мозок і нерви; негативний вплив на роботу вестибулярного апарату	Звеселяє, сприяє до спілкування. Короткочасна дія – концентруюча; тривала – зморення та виснаження	Голосно, пронизливо; збільшує, наближує
Зелений: *Рання зелень:* *Зелено-жовтий*:	Колір природи і свіжості, колір прохолоди; Смак нейтральний; враження тепла; смак кислого	Лікарський колір. Сприяє зниженню кров'яного тиску з причини розширення капілярів	На нервову систему діє заспокійливо; умиротворяє	Голосно; лагідно. Реальна локалізація

Продовження табл. 7.2

Колір/дія	Сенсорна	Фізіологічна	Психологічна	Асоціативна, просторова
Блакитний	Прозора безмежність; лагідно холоднуватий; Смак солонуватий	У фізіологічному плані віднесений до лікарських кольорів; полегшує стан хворого сильніше, ніж зелений	Заспокійливо, створює враження небесної далі; Концентрує увагу	Лагідно проникливо; відадляє
Синій	Враження солідного; холодний; смак кислий	Защемлення м'язів	Колір втоми, викликає сум; концентрує увагу аж до защемлення	Помірковано; віддаляє
Фіолетовий	Пишний і благородний; холодний; смак – солоно-кислий	Позитивно впливає на серце і легені, збільшуючи їх витривалість	Колір нудьги, подразнення; защемляє увагу	Помірковано; віддаляє
Коричневий	Солідний і екстра-вагантний; теплий; смакові асоціації – шоколад, кава	Виражає міць і стійкість предметів; активізує м'язову діяльність	Затишок, комфорт; створює спокій-ний настрій	Помірковано; наближує та звужує поле зору
Пурпуровий	Колір екзотики, північне сяйво; гарячий; смак перцю «Чилі»	Активізує м'язову діяльність; підвищує кров'яний тиск і ритм дихання	Колір збудження, хвилювання та заклику до дій	Пронизливо: поле зору Розфокусоване
Ахроматичні кольори				
Білий	Екстравагантний виклик; солодкий; смак – молоко	Легкість, обережність, точність рухів;	Символ чистоти та незайманості	Сильна дія при одночасному використанні темних кольорів; висуває вперед, створює враження стінки
Сірий	Благородний, діловий, похмурий; Смак – солонуватий	Пригнічення фізіологічних функцій	Темний: апатія та нудьга; світлий – емоційно нейтральний	Світлий: – збільшує, Темний: – зменшує
Чорний	Похмурий, важкий; У малих обсягах застосовується для контрасту;	Пригнічення фізіологічних функцій	Гальмівний ефект: апатія, нудьга; Насторожує	Розсуває межі, зменшує

Значний емоційний вплив кольору на людину. Колір має здатність викликати різні емоційні реакції та думки; може заспокоювати або хвилювати, приносити радість, смуток, пригнічувати або веселити. Серед інших естетичних факторів колір займає одне з важливих місць.

Узагальнюючий вплив кольору на організм людини; видимий спектр розподіляють на три частини: довгохвильову – 760...580 нм (червоний, оранжевий), середньохвильову – 580...510 нм (жовтий, зелений і частково блакитний), короткохвильову – 510...380 нм (блакитний, синій, фіолетовий). На сьогодні встановлено, що кольори довгохвильової частини спектра – теплі кольори, справляють збуджуючий і стимулюючий вплив. Кольори короткохвильової частини – холодні, чинять заспокійливий вплив або ж пригнічують. Найбільш сприятливо впливають кольори середньої частини спектра, які відносять до прохолодних.

Особлива група – *коричневі* та *пурпурові* кольори (теплий та гарячий); перший – це комфорт, затишок, другий збуджує, хвилює та подразнює, закликає до дій. З цієї причини рекомендуємо звертати увагу на ці обставини при колористичних рішеннях.

7.3.6. Вибір та призначення кольорів

7.3.6.1. Колір як інструмент художнього конструювання

Дві грані колористичних рішень: по-перше, вони індивідуальні для окремих функціональних видів виробів; по-друге, мають розрізнятися поміж собою для різних груп споживачів, які ідентифікуються за такими ознаками: інтелектуальний рівень; релігійні (чи атеїстичні) переконання; етнічні уподобання. Ці обставини особливо важливі для експортно-орієнтованих виробів.

Колористичні рішення зовнішніх поверхонь промислових виробів (і приладів зокрема) побудовані на таких факторах:

1) функціонального призначення виробу;
2) конструкторської структури зовнішньої форми;
3) умовах експлуатації виробу та його зовнішньому освітленні;
4) вимог безпеки експлуатації.

Отже, п*ерша грань* колористичних рішень – функціональний зміст виробу, побудова його кольорової моделі. Друга *грань* – конструкторсько-естетичний розв'язок виробу у відповідності до композиційних рішень його форми. Третя грань – динаміка умов експлуатації та зовнішнього освітлення. Четверта *грань* рішень – безпека експлуатації, яка будується на виділенні особливих та небезпечних зон зовнішньої структури.

Конкретизація колористичних рішень полягає в такому:

1) для приладів із тривалим терміном експлуатації, які використовуються в технологічному процесі, кольорова насиченість може гармонійно змінюється. Для споживчих товарів короткочасного використання можливі чисті кольори;

2) при колористичних рішеннях приладу необхідно враховувати аналогічні рішення як робочої зони (зони установки), так і приміщення в цілому. Виникає дилема – прилад для робочої зони чи зона для приладу;

3) кольорові контрасти повинні вибиратись з урахуванням тривалості їх сприйняття. Для виробів повсякденного використання, а також для робочих

приміщень, засобів праці доцільні помірковані контрасти. При короткочасному сприйнятті, особливо високої інтенсивності, можливі сильні контрасти;

4) кольори сигналів і пізнавальних знаків, таких як червоний, жовтий, зелений, або ж червоний (гарячий) і синій (холодний), мають бути чистими. Для сприйняття кольорів великих площ чистота кольору фарбованого покриття може бути меншою.

5) лаки, які змінюють колір підґрунтя або ж свій власний у залежності від кута спостереження, викликають візуальні шуми, тому їх необхідно застосовувати лише у окремих випадках або ж взагалі не застосовувати. Для фарбування робочих місць всіх типів такі лаки не рекомендовані.

Вибір лакофарбового покриття за декоративними властивостями (колір, блиск, фактура і клас відповідно до ДСТУ ISO 12944-5:2020), проводять на стадії проєктування і призначають згідно з ДСТУ EN 15060:2015 за табл.7.3.

Акцентуємо, що колір значно мірою визначає *моральне старіння* (знос) виробу.

Таблиця 7.3.

Рекомендації щодо вибору лакофарбових покриттів

Найменування груп виробів	**Вимоги до кольорів і кольорових спряжень лакофарбових покриттів**	**Вимоги до фактури та блиску**
Вироби, що функціонують у виробничих приміщеннях в контакті з людиною – прилади, верстати, машини, обладнання, організаційна, обчислювальна техніка та ін.	Поєднання кольорів – споріднені, споріднено-контрастні. Кольори червоної, оранжевої, жовтої, зеленої, блактиної, синьої груп; ахроматичні складні; світлі, середні, темні за яскравістю; малої та середньої насиченості Число основних кольорів у схемі кольорового рішення – не більше 3. Поєднання кольорів: споріднене, наприклад, “слонова кістка” (№ 229), сіро-зелений (№ 352), споріднено-контрастні, і сіро-зелений (№ 365)	Гладкі, глянцеві, напівглянцеві, напівматові. Допускаються гладкі з малюнками (молоткові, рельєфні)
Вироби культурно-побутового призначення, що функціонують у житловому інтер’єрі в контакті з людиною, наприклад, пилососи, пральні машини, холодильники, побутова радіоелектронна апаратура, вентилятори, кондиціонери, ручний механізований інструмент та ін.	Кольори червоної, оранжевої, жовтої, зеленої, голубої, синьої зон і ахроматичні; складні, світлі, середні, темні за яскравістю; малої, середньої і максимальної насиченості Кількість основних кольорів в схемі кольорового рішення – не більше 2 Поєднання кольорів: споріднені, споріднено-контрастні, контрастні та еквівалентні	Гладкі, рельєфні, глянцеві і напівглянцеві

7.3.6.2. Колористичні контрасти

Очевидно, колористичні контрасти формуються так:

- кольором оточення (стіни, стеля, інше) приміщення розташування;
- кольором поверхонь установки технічної системи (несучих поверхонь);
- основним кольором технічної системи;
- контрастом зовнішніх корпусних поверхонь технічної системи, серед яких основною є лицева панель, де розміщені основні елементи управління;
- окремих зон лицевої панелі, в яких розташовані окремі функціонально споріднені органи керування;
- відмінність у кольорах органів керування та поверхонь їх монтажу.

Контрасти як елементи колористичних рішень викликають підсилення уваги або її концентрації, що в свою чергу змінює стан психоемоційних напружень оператора. При цьому контрасти необхідно ретельно урівноважувати з фоном оточення при урахуванні всіх умов застосування виробів.

Використання контрастів базуються на *таких аксіомах*:

1. Зменшення кількості контрастів та їх урівноваження веде до пониження психофізичних навантажень.
2. Низький контраст понижує здатність оператора до розрізнення деталей, викликає психічне зморення. Недостатність освітлення приміщення, однотипність приладів різного призначення викликає формальне вирівнювання ознак сприйняття деталей, і як результат – помилки в діях.
3. Сильний контраст також понижує здатність до сприйняття та швидкість реакції.
4. При тривалій дії (тривалий час роботи) контрасти мають бути поміркованими. Насамперед це стосується фарбових оздоблень робочих приміщень.
5. При короткочасному сприйнятті допускається використання сильних контрастів; наприклад, фарбові рішення сигнальних пристроїв.

7.3.6.3. Колористичні рішення фону, функціональних зон і зон управління (сумісно з попереднім)

Колір фону повинен бути доповнюючим (інакше – контрастним) до кольору деталі: світло-коричневий до сталі, чавуну та алюмінію; світло-голубий до бронзи, дерева та інших деталей теплих кольорів; ахроматичний для різнокольорових деталей і т. ін. Особливе значення має колір при конструюванні кнопок, перемикачів, важелів управління приладів і пультів управління, мнемосхем та інших елементів для безпеки й надійності роботи. Недостатній контраст між кнопкою та фоном панелі пульта може призвести до помилки або викликати аварію. Деякі вироби потребують контрастних і яскравих тонів (планери, спортивні атрибути, дитячі іграшки, туристичне

обладнання тощо), а інші – світлих і м’яких тонів – це медичне обладнання, прилади, верстати.

Пульти та прилади відносять до виробів із прихованою структурою, тобто такі, в яких більшість конструктивних елементів приховано від зовнішнього споглядання. Щити пульта чи приладу належать до структури і колір відіграє для них дуже важливу візуальну роль. Лицьова панель виділяється особливим кольором, відмінним від оточення. При великих розмірах пульта або лицьової панелі їх потрібно ділити на окремі ділянки, щоб підкреслити різне функціональне призначення.

Вироби, виготовлені у стриманій гамі з використанням мінімуму кольорів, сприймаються як масштабні; і навпаки, використання збільшеної кількості кольорів та з підвищеним взаємним контрастом створює відчуття зменшеного масштабу.

Для естетичної виразності зовнішнього вигляду виробу важливе значення має фактурне оздоблення. Поверхні, що обрамлюються, можуть бути глянцевими (дзеркальне відбиття), матовими або шорсткими (дифузне відбиття), навпіл матовими або наполовину глянцевими. Найбільш повно й естетично колір проявляється на матовій фактурі, а глянець дещо маскує колір. Матова фактура та різні фактурні візерунки (муаровий, рифлення, пухирчатий) широко використовуються в оздобленні сучасного обладнання приладів.

Для отримання в дизайні приладу або пульта потрібного кольору та фактури поверхні використовуються різні способи обробки – різні технології виготовлення і матеріали (лиття, штампування, шліфування, полірування, пресування), а також різні види покриття – лакофарбові, гальванічні, склоемалеві. Існує багато видів гальванічних покриттів, що широко застосовуються в приладобудуванні як для захисту металевих деталей від корозії, так і з декоративне-оздоблювальною метою. Для цього застосовують покриття нікелем, хромом, цинком, свинцем, оксидними плівками, бронзою; покриття сріблом використовують для зменшення поверхневого імпедансу робочих поверхонь хвилеводів. У довідникові літературі широко представлені фізико-хімічні характеристики металів, що часто використовуються для оздоблення деталей приладів та виробів культурно-побутового призначення.

7.4. Засоби та інструменти реалізації технічної функції

7.4.1. Вступ

1. До засобів зв’язку в системі людина – прилад (людина – машина) відносимо елементну базу (*БЕ*), яка виконує функції керування, сигналізації та обміну інформацією.
2. Зовнішньою ознакою приладу є його розміри, які не можуть виходити за межі розмірів людини.
3. Всі конструктивні елементи *БЕ* повинні розташовуватись в зоні досяжності стоячого або сидячого оператора, *без зміни пози*.

4. При сумісному використанні великої кількості приладів або ж пультів керування технологічними процесами зона обслуговування не має виходити *за межі моторного простору* людини, який визначається розмірами людини (див. рис.6.11 та рис 7.9).
5. Тісний зв’язок між приладом і оператором, обумовлений п. 3, оголошує високі вимоги до технічної та естетичної досконалості лицевих панелей і виконавчих елементів.
6. Сказане в п.5 стосується й інших виробів, які тривалий час разом з приладом знаходяться в контакті з споживачем (оператором).
7. Оскільки прилади розташовані дуже близько до користувача, всі їхні конструктивні, робочі, сигнальні, інформативні елементи сприймаються споживачем нерозривно один від одного і відносно рівноцінно, на противагу великим технічним виробам, де ієрархія форм з частковою автономністю різних зон і елементів виражена чіткіше. Ось чому абсолютно одні й ті самі подразнення щодо сприйняття приладів виявляються дещо сильніше, ніж такі ж прояви виробів машинобудування.
8. Антропометричні особливості рук, пальців і їх закінчень при безпосередньому застосуванні приладів є складовою частиною елементів, що визначають формування сприйняття. Особливо це стосується кінематичних і змінних зв'язків сприйняття.
9. Мініатюризація при широкому використанні досягнень (мікро) електроніки дозволяє використовувати форми, що забезпечують керування приладом тільки пальцями, причому введення і виведення інформації здійснюється на нижній межі чутливості органів сприйняття. Яскравим прикладом мовленого є сучасні “гаджети” з тактильним керуванням.

7.4.2. Елементи зв'язку в системі «людина – прилад»

7.4.2.1. Робоча зона елементів зв’язку; преамбула

1. Робоча зона – це зона розташування елементів зв’язку, тобто *органів керування, сигналізації, обміну інформацією*.

2. Зовнішні межі робочої зони і приладу в цілому як візуальної системи відліку справляють основний вплив на порядок і напрямок розташування елементів зв'язку.

3. Першим і найефективнішим заходом, спрямованим на створення наочної і доступної для сприйняття робочої зони, є зменшення кількості візуальних конструктивних елементів. Видимі елементи в цій зоні необхідно обмежити тими, в яких є постійна потреба в процесі застосування; елементи, що використовуються зрідка, переважно для налаштувань та контроллерів, можна розмістити на інших сторонах приладу або ж взагалі приховати.

4. Необхідно прагнути до поєднання кількох робочих операцій, які виконуються з відповідними елементами. Можливість таких

поєднань має бути досліджена на стадії розробки функціонального рівня приладу. Кількість споглядальних елементів доцільно скоротити до рівня, що забезпечує експлуатаційну та ергономічну безпеку.

7.4.2.2. Геометрія робочої зони

Вибір геометрії робочої зони проводиться з урахуванням сказаного у преамбулі та перелічених нижче рекомендацій.

1. Особлива увага має бути приділена візуальній рівновазі правої і лівої, а також верхньої та нижньої частин лицевої панелі. Необхідно знати, *що візуальна середина знаходиться дещо нижче геометричної середини*: верхня частина дещо більша, а нижня – менша (внаслідок фізіологічних особливостей ліній зору, рис. 6.2).
2. Крайові і залишкові поверхні лицевої панелі візуально сприймаються як окремі елементи, тому повинні ретельно враховуватися у формі всього вироби як самостійні.
3. Обрамлення, які часто використовуються для акцентів та обмеження зон, необхідно здійснювати лише однократно, не роздвоюючись, уникаючи складних оздоблювальних рішень у вигляді різноманітних крайок, пазів, фасок, забарвлень, ступенів полірування.

7.4.2.3. Розташування елементів зв'язку

1. Розташування елементів зв’язку (або їх груп) у межах робочої зони визначається їх логічним упорядкуванням відповідно до ваги кожної складової; таке впорядкування здійснюється згідно з функціональною послідовністю у роботі технічної системи та найбільш сприйнятливими умовами застосування при дотриманні ергономічних положень.
2. В основі конструювання робочої зони лежить формування так званих «інформаційних ліній», в межах (або вздовж) яких встановлюють інформаційно-комунікативні групи елементів керування (рис. 7.9).
3. Всі засоби візуального впорядкування (див. розділ 7.5) повинні бути використані для розв’язання таких задач:
   - *узгодження логіки сприйняття з логікою процесу функціонування та застосування;*
   - *узгодження структури сприйняття елементів зі структурою їх призначення;*
   - *забезпечення візуальної сумісності при інформаційній єдності сумісно працюючих приладів;*
   - *створення гармонійної єдності приладу в цілому і комунікаційних елементів з врахуванням властивостей цих елементів, їх розташувань та особливостей форми*.
4. Всі елементи, які охоплюються органами зору й іншими органами відчуттів, повинні бути враховані при конструюванні *рівноправно*.

Для сприйняття немає другорядних елементів, якщо тільки інтенсивність викликаних ними подразнень не нижче шумових подразнень.

5. Спеціальні правила конструювання, навіть для приладів одного типу, володіють обмеженим застосуванням і можуть бути скасовані іншими варіантами рішення.

Візуальне впорядкування занадто складне, щоб можна було б сформулювати єдині правила розташування елементів на панелях приладів. Приклад розташування елементів на лицевій панелі здійснюється відповідно до відносних візуальних та інформаційних центрів ваги окремих елементів (рис. 7.9) з врахуванням функціонального підпорядкування [2].

Ця задача розв'язується розташуванням елементів вздовж осі або по обмежувальній лінії. Як бачимо, обирається нижня, верхня або бічна межа, в залежності від умов огляду або особливості спряження їх з іншими функціональними елементами зовнішньої структури приладу, або ж з супутніми приладами.

У приладобудуванні не слід гнатися за ефектами, модними тенденціями і «плакатною» рекламою, оскільки прилади мають відносно тривалий термін служби і працюють в різних комбінаціях з приладами інших виробників, від яких вони не повинні суттєво відрізнятися. Такі, так названі «несерйозні» прилади, є джерелом *«візуального шуму»,* насамперед ускладнюють роботу з ними.

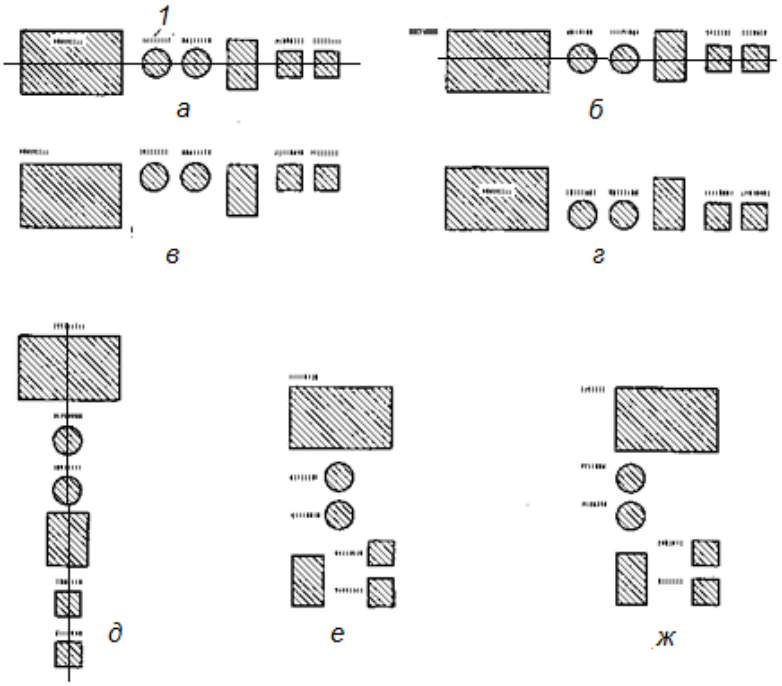


Рис. 7.9. Варіанти розташування органів керування, елементів сигналізації та позначення в прямокутній візуальній системі відліку за інформаційною лінією:
а, б, д – розташування по осі: візуальні центри елементів розташовані на одній прямій;
в, г, е, ж – розташування «по межі»: елементи лежать на візуальній дотичній;
1 – текст, умовні зображення та ін.

7.5. Знакова інформація

Графічний символ. В основі зорового сприйняття знака лежить графічний символ. Символ – це зображення того, що існує в нашому понятті як деяка реальність, наперед обумовлена у вигляді нормативних зображень. Якщо який-небудь символ (знак) не являє собою в нашій пам'яті відображення чого-небудь, то такий знак буде не символом, а просто зображенням (наука про знаки – *семантика)*. *Особливо яскраві приклади можна навести з комп'ютерної техніки та техніки зв'язку (смартфони), де символи вийшли за межі мовного бар'єра.*

Правила обміну інформацією визначені різними інструкціями про умовні позначення. Останні дуже тісно пов'язані з правилами естетичних розв'язків виробів. Дієвість семантичної інформації може бути посилена або ослаблена формально-естетичною інформацією. Виявлення ґрунтовних характеристик виробу, необхідних для оптимального використання, передбачає наявність певних знань у споживача. Споживач повинен отримати для цього деякі пояснення (знання), які можуть бути представлені у вигляді знаків, що викликають у нього конкретні асоціації чи такі асоціації, які розшифровуються в результаті навчання. Крім того, сам об'єкт (прилад) або його елементи можуть відігравати роль знаків. Один і той самий прилад, залежно від умов застосування, може нести різну, навіть суперечливу попередній, знакову інформацію. Властивості об'єкта можуть бути знаками (наприклад, знаками цінності) або змінювати своє значення, яке набувається з суспільної практики. Наприклад, естетичні властивості деякого об'єкта окремими споживачами можуть бути охарактеризовані як непотрібні.

Знаки на приладах. Знаки наносять для позначення функцій і виділення органів управління, інформації та сигналізації. Вони мають форму шрифта та інших графічних елементів. Знаки можуть порушувати візуальну рівновагу, а також процес сприйняття і значною мірою впливають на загальне враження про прилад. Тому їх візуальний вплив має враховуватися з самого початку вибору форми вироби.

Безтекстові знаки являють собою як окремі літери, так і умовні та образотворчі (зображувальні) знаки, що наносяться графічним шляхом або забарвленням [2] (рис. 7.10).

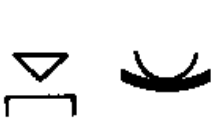
Клас (характер) знака	**Асоціативний**	**Образотворчий (піктограми)**		
Приклади позначення «натиснути»				
Назва знака	Змістовний	Абстрактний наочний	Натуральний наочний	

Рис. 7.10. Знаки (елементи) позначень, що наносяться на прилад

Нижче перераховані рекомендації по вибору знаків для приладів.

1. Елементи позначень повинні використовуватися економніше, вони мають бути наочні й узгоджені із загальною формою приладу.
2. Необхідно уникати близького розташування шрифтових знаків різного типу, навіть при різних способах їх нанесення.
3. Одночасне зчитування жирного, щільного і вузького шрифтів дуже ускладнено.
4. Вибір типу і розміру шрифту залежить від швидкості читання, відстані до нього під час читання, умов освітлення, якості друку тощо. Розмір шрифту має бути не менше 1/200 відстані до нього, проте мінімально можливим; шрифт не має порушувати загальне враження від виробу та займати якомога менше місця.
5. Для коротких позначень (ефект «плями»), яким завжди доцільно надавати перевагу, потрібно використовувати шрифти без зарубок (наприклад, фоліо, Універс, супергротеск, фундаменталь або спеціальний гротеск). Для довгих текстів більш привабливе використання шрифтів із зарубками (наприклад, Бодоні).
6. Малі літери краще зчитаються на відстані до 3 м, прописні – на відстані 5 м і більше.
7. Безтекстові знаки за своїми розмірами і формою повинні відповідати шрифтам, що використовуються одночасно з ними. Розміри і «вага» різних безтекстових знаків мають бути візуально подібні (візуально номінальний розмір).
8. Багатоколірні елементи позначень необхідно використовувати тільки тоді, коли функціональні вимоги не можуть бути виражені інакше. У більшості випадків мультиколірність можна замінити допоміжними, обмежувальними й опорними лініями.
9. Відстань між знаками органів управління та сигналізації необхідно вибирати так, щоб загальне враження було врівноваженим. Відстань між двома знаками найчастіше відповідає їх висоті. В межах однієї групи ця відстань має відрізнятися від такої ж в іншій.
10. Позначення типу, дані про виробника та ін. треба наносити так само, як і інші знаки. Однак, вимоги розрізнення цих позначень з відносно великих відстаней (при зберіганні, спостереженні тощо) можуть спричинити відповідне збільшення їх розмірів.
11. На сьогодні вся інформація про виріб, виробника (інше) закладена в *штрих-коди*.

Знаки як елементи приладу повинні розроблятися сумісно зі спеціалістами з інженерної психології. Знаки наносять з урахуванням інших елементів позначень (ліній, надписів) і є складовою частиною загального художньо-конструкторського рішення виробу.

7.6. Органи керування (homos-комуніканти)

Органи керування є ланками зв'язку в системі «людина-машина», тому вони підлягають належним ергономічним вимогам – це зручність, відповідність, безпека. Проблемами відповідності форми елементів керування, пов'язані з рухами рук людини, які забезпечують зручність в експлуатації, займається прикладна дисципліна ергономіки – *хіротехніка*.

Існують три основних системи керування: ручна, змішана й автоматична.

В табл. 7.4 наведені схеми та характеристики, розміри та силові параметри, які повинні забезпечуватись при розробці нових або виборі існуючих органів керування, що приводяться в дію окремим пальцем, їх сукупністю або долонею. Відомості про елементи, які приводяться в дію ступнями ніг, тут не розглядаються.

Керування в сучасних приладах переважно забезпечується сенсорними або мембранними конструкціями, які в першому випадку спрацьовують від дотику пальцем, а в другому – незначним притиском пальця до пружного елемента мембрани. У зв'язку з відсутністю механічних деталей такі конструкції володіють високою надійністю, тривалим терміном експлуатації, одночасно зручні в користуванні. До цих переваг необхідно додати низькі витрати на виготовлення внаслідок інтегральних технологій та відсутності металу. Принцип дії таких елементів керування оснований на зміні електричного опору, потенціалу або ємності в момент дотику пальця до чутливої зони переходу. Впорядковане розташування цих зон формує віртуальну клавіатуру на цифрових світних екранах, якою ми успішно користуємось у сучасних смартфонах.

Система і органи керування вибирають на основі ретельного аналізу техніко-економічних вимог до керування з врахуванням маніпуляцій, що виконуються цими органами.

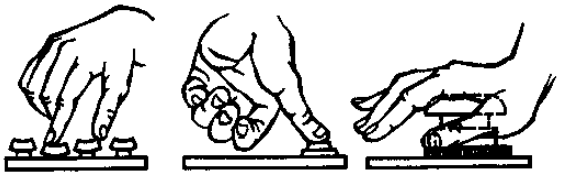
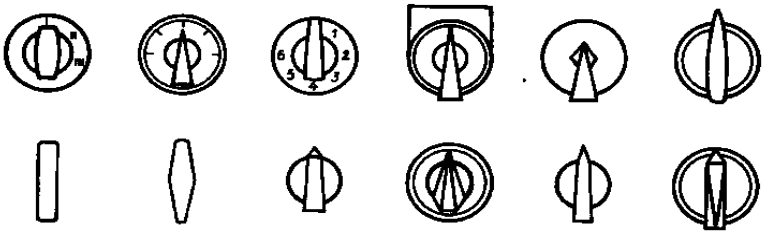
В табл. 7.4 показані найбільш використовувані елементи керування в приладобудуванні та їх характеристики [2, 54].

Органи керування поділяють на такі групи за призначенням поділяють на такі групи:

1. Органи увімкнення і вимикання – кнопки, тумблера, рукоятки, важелі, педалі та ін.
2. Органи перемикання – рукоятки для ступеневого перемикання, поворотні штурвали для плавного перемикання, спарені та потрійні рукоятки і штурвали для багатостоступінчатого перемикання від 180° до 360°.
3. Органи регулювання – маховики і штурвали для механічного регулювання, мнемонічні рукоятки, кнопки, верньєри, для електричного, гідравлічного і пневматичного (вакуумного) регулювання. Ці елементи в деяких випадках також відносять до органів увімкнення та вимикання.
4. Органи аварійних дій – за принципом дії конструкції переважно збігаються з органами увімкнення та вимикання.

Таблиця 7.4

Органи керування пальцями рук або рукою

Назва елемента	**Характеристика**
Вимикач (тумблер)	 Циліндрично-фасонний стрижень із радіально-позиційним переміщенням: двопозиційний, трипозиційний
Вимикач кнопковий, клавішний	 Кнопковий, клавішний, грибковий вимикач; при дії пальцем робоча поверхня увігнута, долонею – випукла
Перемикач: поворотний важіль	 Дискретне або плавне переміщення по кругу, забезпечує здійснення візуального і тактильного контролю положення
Поворотна ручка Плавне регулювання	 Ø ≈ 10 мм Оптимальний опір обертанню 0,75 Н·см, мах 5 Н·см  Ø 15 – 25 мм Оптимальний опір обертанню 4 Н·см, мах 40 Н·см
Рукоятка обертання Плавне та дискретне регулювання	 Ø 25 – 40 мм Оптимальний опір обертанню 10 Н·см, мах 100 Н·см  Ø 60 – 80 мм Оптимальний опір обертанню 30 – 100 Н·см, мах 300 Н·см  Ø < 120 мм Оптимальний опір обертанню 300 –500 мах 1000 Н·см

Основні органи керування необхідно зосереджувати на відносно невеликій площині, виділяючи у групи відповідно до призначення. Концентрація цих органів у дуже малій зоні не рекомендована, позаяк можливі помилки при

маніпуляціях вимикачами, перемикачами тощо. Їх розміщують двома-трьома чітко розрізненими групами.

Аварійні – дещо відсторонюють та виділяють окремо; переважно аварійну групу виділяють червоним кольором. Кольорове маркування можна застосовувати і до визначальних основних органів керування.

7.7. Групове використання приладів і пульти керування

Компоновка і конструювання органів керування пульта або групове використання приладів – це належне розташування всіх видів органів керування на лицевих панелях та їх зовнішнє оформлення.

При цьому необхідне врахування інформаційного поля зорового сприйняття та зони досяжності в моторному полі.

При груповому використанні приладів лицеві панелі, як правило, розміщують відповідно до робочої поверхні так, аби їх площини були перпендикулярними до поля зору оператора, а органи керування знаходилися в межах досяжності відповідно до антропометричних вимог.

Пульти керування включають обладнання таких груп:

1. Серійні прилади;
2. Функціональні модулі спеціального призначення (СФМ);
3. Системи забезпечення роботи (СЗР).

При сидячому положенні рекомендована схема розташування індикаторів та органів керування для компоновки пульта, яка зображена на рис. 7.11.

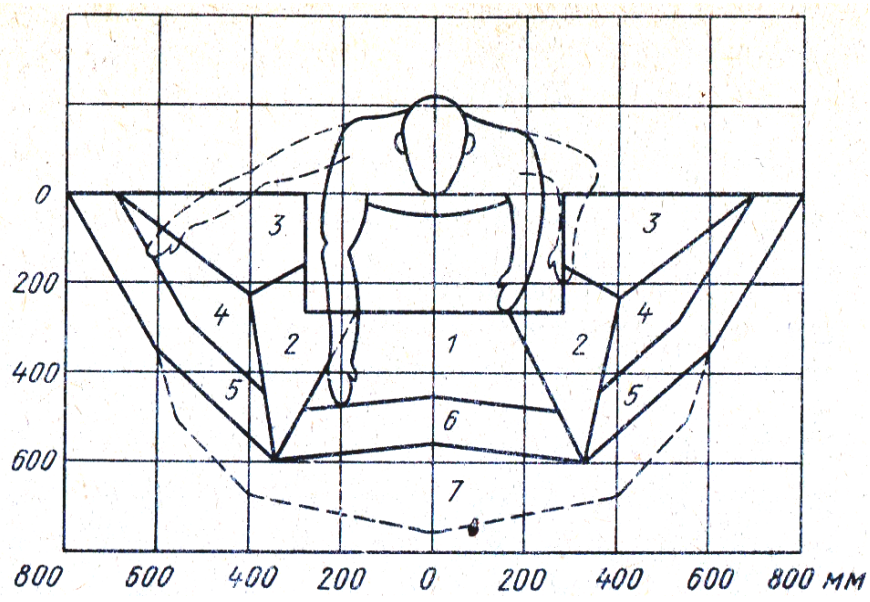


Рис. 7.11. Схема зон розташування індикаторів та органів керування для компоновки пульта; горизонтальна площина [24]

Основні органи керування, що часто використовуються – зона 1, 2, 3. Органи керування, які використовуються для тонких регулювань, – зони 1, 2. Органи керування, які потребують значних зусиль, – зона 2 та 4.

Індикатори та інформаційні покажчики, які вимагають особливої уваги, розміщують у зоні точного зору (позиції 6, 7), допоміжні індикатори – у зоні 5.

Елементи позначень і сигналізації не повинні закриватися ні органами керування, ні рукою (при погляді з різних напрямків).

Висота панелі пульта керування встановлюється так: 120 см у разі необхідності проглядування простору позаду пульта, а при відсутності такої потреби – 165 см. Ногам оператора в положенні сидячи необхідний простір шириною 63 см, а глибина – 45 см.

У практиці художнього конструювання останнім часом дедалі більша увага приділяється уніфікації. З цією метою створюються типові вузли, деталі, агрегати, які мали б мати, по можливості, єдину форму, по-перше, а по-друге – їх функціональне призначення має універсальний характер; випускаються виробниками як автономні, в окремих корпусах, так і безкорпусні, які монтуються безпосередньо у корпуси пультів.

Наприклад, джерела живлення, генератори, вакуумметри тощо.

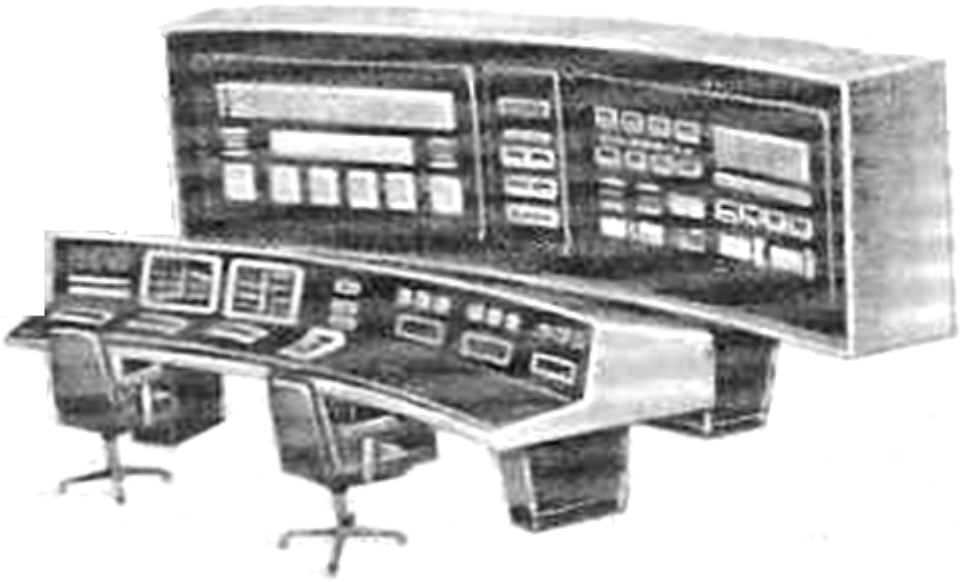


Рис. 7.12. Пульт керування АСУ

Зовнішнє оздоблення лицевих панелей, окремі деталі, які контактують з органами дотику людини, особливо органи керування, мають бути виконані з матеріалу, що робить цей контакт естетичним і комфортним, при належній обробці поверхонь. При частому контакті з людиною ця вимога *має бути* ***виконана безумовно.*** Приклад пульта автоматичної системи управління (АСУ) демонструється на рис. 7.12 [54].

7.8. Ергономічна оцінка систем “людина – машина”

Ергономічна оцінка систем “людина – машина” (“людина – прилад”) (СЛМ), пультів керування автоматичних ліній дає змогу з’ясувати рівень надійності названого та вжити заходи для максимального підвищення ефективності їх застосування. Оцінка починається зі складання плану проведення досліджень відповідно до позицій та вимог сформульованих у європейському стандарті

EN 614-1:2006A1:2009(E), ***«ЕРГОНОМІЧНІ ПРИНЦИПИ КОНСТРУЮВАННЯ: безпека обладнання»*** [69].

Основні етапи досліджень ергономічності рекомендовано виконувати за такою схемою:

а) ознайомлення з призначенням та задачами системи, основними вимогами до неї;

б) побудова структурної схеми, що відтворює зв'язки окремих підсистем, потоки інформації та хід регулювання; при цьому окремо виділяються "людські" ланцюги з позначенням прямих і зворотних зв'язків між оператором СЛМ та машиною, а також між окремими операторами; необхідно дослідити інтенсивність зв'язків та їх відносну важливість;

в) оцінка середовища, в якому система функціонує, його вплив на СЛМ, що досліджується;

г) опис функцій системи та її підсистем для всіх режимів роботи, включаючи малоймовірні аварійні ситуації; при визначенні функцій необхідно виявити, які з операцій найважливіші; окремо необхідно встановити динамічну структуру системи, тобто які реакції виникають в окремих підсистемах при дії різного роду завад та ін.

д) детальна ергономічна оцінка робочого місця;

е) оцінка засобів відображення інформації і органів управління;

є) розгляд функцій операторів для нормального режиму роботи та окремо для екстремальних ситуацій. При цьому необхідно докладно проаналізувати умови, які можуть призвести до виникнення аварійної ситуації;

ж) оцінка функцій оператора за часом; для цього будується професіограма діяльності;

На підставі вищезазначеного формується висновок про надійність і ефективність системи, наводяться рекомендації щодо модернізації або вдосконаленню окремих підсистем, вузлів або ж всього виробу.

Примітка. В основу ергономічної оцінки робочого місця покладені дослідження геометричних умов розташування користувача щодо засобу і його контактів з ним, які визначаються антропометричними та ергометричними властивостями людини. Як відомо, суть перших – це статичні та кінематичні розміри тіла людини; другі – динаміка м'язових зусиль органів. Перша група визначає процеси підведення та відведення предмета випробування (праці), відомих під поняттям «*геометрія робочого процесу*», а друга – робочі зусилля щодо органів керування. Сукупність наведених факторів об'єднуються поняттям *«моторне поле оператора»*. Ці фактори накладають обмеження на геометричні форми технічного об'єкта. Вони визначають форму нового технічного виробу, як правило, ефективніше, ніж технічно обумовлені форми. Вказаний підхід до формування нових типів геометричних форм формує основні асоціації вищого порядку. Ергономіка не є дисципліною, що безпосередньо займається формою виробів. Вона описує лише функціональні та конструктивні умови, що визначають форму виробу, закладену в проєкт конструкторами та фахівцями з художнього конструювання. Отже, *ергономіка* формує природничо-наукову основу вибору форми виробу.

Додаток 7.1

7.9. ЄВРОПЕЙСЬКИЙ СТАНДАРТ *ЄН 614-1:2006А1:2009(Е) [70]*

ЕРГОНОМІЧНІ ПРИНЦИПИ КОНСТРУЮВАННЯ

Безпека обладнання

Частина 1

Терміни, визначення та загальні принципи

Safety of machinery. Ergonomic design principles.
Part 1: Terminology and general principles.

Вступ

Мета розробки цього стандарту – надати конструкторам та виробникам посібник з безпечного конструювання робочого обладнання виробничого та невиробничого призначення з урахуванням загальних ергономічних принципів для досягнення гармонізації з європейським законодавством.

У цьому стандарті поняття «Ергономіка» стосується багатогалузевої наукової дисципліни та її застосування. При застосуванні ергономічних принципів у конструюванні робочої системи важливо враховувати людські здібності, вміння, обмеження та потреби, коли розглядають взаємодію між людиною (оператором), робочим обладнанням та робочими умовами.

Ергономічна робоча система підвищує безпеку, продуктивність та ефективність праці, поліпшує умови роботи і життя людини, зменшує шкідливий вплив на її здоров'я та ефективність діяльності.

Цей стандарт – один із комплексу стандартів «Безпека обладнання», розроблених на виконання європейських директив та угод.

1. Область застосування

Цей стандарт встановлює терміни та визначення понять у сфері безпеки робочого обладнання та загальні ергономічні засади його конструювання з метою забезпечити гармонізацію національних (українських) стандартів з європейськими стандартами. Він визначає взаємодію між оператором та робочим обладнанням під час його транспортування, встановлення, експлуатації, технічного обслуговування, чищенні та містить ергономічні принципи, які необхідно враховувати для збереження здоров'я та безпеки оператора.

Ергономічні принципи цього стандарту стосуються, без обмежень, різних типів індивідуальних особливостей операторів.

Інформацію про розмір тіла оператора необхідно інтерпретувати так, щоб вона підходила до відповідної групи операторів.

Стандарти, зазначені в додатку Б, наведені лише для інформації.

2. Нормативні посилання

Цей стандарт використовує посилання на такі стандарти:

- ***ДСТУ ІСО/ТО 12100-1-2001*** Безпека устаткування. Основні поняття, загальні засади конструювання. Частина 1. Основні терміни, методика.

- ***ДСТУ ІСО/ТО 12100-2-2002*** Безпека устаткування. Основні поняття, загальні засади конструювання. Частина 2. Технічні правила та технічні вимоги.

3. Визначення

У цьому стандарті застосовують такі терміни з відповідними визначеннями:

3.1 оператор: особа (або особи), яка(і) займається(ються) встановленням та пуском в експлуатацію, налагодженням, технічним обслуговуванням, чищенням, ремонтом або транспортуванням обладнання (див. 3.21) ***ДСТУ ІСО ЯО 12100-1***).

3.2 робоче завдання: діяльність, яка необхідна для досягнення робочою системою заданого результату.

3.3 робоче обладнання: машини, інструменти, транспортні засоби, пристрої, механізми, установки та інше приладдя, що використовуються у робочій системі.

3.4 робоча область: простір, призначений одному або декільком операторам у робочій системі для виконання робочого завдання.

3.5 робочі умови: фізичні, хімічні, біологічні, організаційні, соціальні та культурні фактори, які оточують оператора у його робочій області.

3.6 робоче місце: сукупність робочого обладнання робочої області, оточеного робочими умовами.

3.7 робоча система: робоча система включає в себе взаємодію одного або кількох операторів з робочим обладнанням, щоб виконувати робоче завдання у робочій області, у робочих умовах, за встановлених робочим завданням режимів.

3.8 планування роботи: організація та послідовність виконання у часі та просторі індивідуальних завдань.

3.9 організація роботи: забезпечення взаємодії операторів у робочій(их) системі(ах).

3.10 робоче напруження (або зовнішнє навантаження): сукупність зовнішніх умов та вимог у робочій системі, які можуть негативно вплинути на психологічний чи фізіологічний стан оператора.

3.11 робочий стан (або внутрішня реакція): вплив робочого напруження на оператора в залежності від його індивідуальних особливостей та здібностей.

3.12 робоча втома: місцевий або загальний непатологічний прояв робочого стану, який може бути усунений повністю після відпочинку.

3.13 робоча діяльність: будь-яка діяльність оператора, спрямована на досягнення заданого результату робочої системи.

3.14 орган керування: частина системи керування, яка призначена безпосередньо для впливу оператором, наприклад, шляхом натискання.

4. Загальні принципи

У наступних підпунктах цього стандарту надано інформацію про ергономічні принципи, які необхідно враховувати під час конструювання машини.

Для досягнення ефективної, здорової та безпечної взаємодії операторів із робочим обладнанням треба враховувати в процесі конструювання ергономічні принципи та технічні вимоги безпеки.

Дотримання ергономічних принципів необхідно не лише для призначеного використання робочого обладнання, а й для його транспортування, встановлення, регулювання, технічного обслуговування, чищення та ремонту. Оскільки окремі конструктивні рішення можуть вплинути один на одного, у процесі конструювання варто враховувати також будь-яку їхню взаємодію. З цієї причини конструювання розглядає головним чином взаємодію оператора та робочого обладнання, а також поділ функцій та робіт між оператором та робочим обладнанням. Метою є конструювання робочої системи, що узгоджується зі способами, обмеженнями та потребами людини.

Ось чому необхідний аналіз робочого завдання у процесі конструювання.

4.1. Конструювання з урахуванням антропометрії та біомеханіки

4.1.1. Розміри тіла

Устаткування має конструюватися з урахуванням розмірів тіла передбачуваної групи операторів. При цьому необхідно враховувати:

• розміри тіла дорослих, дітей та людей похилого віку (статичні та динамічні, у відповідному одязі та/або із засобами індивідуального захисту);

• простір для руху тіла та його частин;

• безпечні відстані;

• доступні розміри (при роботі, ремонті та технічному обслуговуванні) з використанням, наприклад, антропометричних шаблонів, макетів чи комп'ютерних моделей.

При конструюванні обладнання необхідно враховувати такі принципи:

а) висота та інші функціональні розміри обладнання повинні відповідати даним оператора та виду виконуваної ним роботи та підганятися/підбиратися, наприклад, шляхом регулювання;

б) вигляд, розташування та регульованість місця для сидіння повинні передбачатися з урахуванням розмірів оператора, його пози та виконуваних ним функцій;

в) має бути передбачений достатній простір для руху частин тіла, що беруть участь у роботі, щоб можна було виконати робоче завдання у зручній позі та зручними рухами; доступ та зміна пози мають бути легкими;

г) ручки та педалі обладнання повинні відповідати за формою та функціями анатомії руки або ноги, а також розмірам тіла групи операторів. Ручки для ручного робочого обладнання повинні бути сконструйовані так, щоб оператор міг правильно за них взятися і виконати передбачений рух;

д) часто застосовувані органи керування, ручки та педалі повинні бути розташовані так, щоб вони були доступні оператору у нормальній робочій позі. Інші важливі органи керування, наприклад, аварійні пристрої, повинні бути розташовані так, щоб оператор міг їх легко дістати; рідше використовувані органи керування не обов'язково повинні бути в межах досяжності, якщо цього не вимагає робоче завдання.

Робоче обладнання для використання жінками та чоловіками має враховувати відповідні процентилі для жінок та чоловіків (див. ЄП 547-1 та ЄП 547-2).

При визначенні внутрішніх розмірів (наприклад, простору для ніг) необхідно використовувати значення 95-ї процентилі. Для меж досяжності (наприклад, межі досяжності для оператора) необхідно застосовувати значення 5-ї процентилі. Для регульованих розмірів робочого обладнання прийнятний інтервал повинен включати від 5 до 95 процентилів.

Примітка.

З точки зору здоров’я, безпеки та ефективності при конструюванні робочого обладнання необхідно залучати якомога більше груп операторів. Такі чинники, як недостатнє місце для ніг, впливають самопочуття оператора. Майбутні стандарти містять антропометричні дані про європейське населення, а також про застосування цих даних. При конструюванні робочого устаткування для осіб з інвалідністю необхідна особлива ретельність в аналізі.

4.1.2. Поза тіла

Поза тіла оператора під час роботи не повинна завдавати шкоди здоров’ю.

При конструюванні обладнання необхідно враховувати такі принципи:

а) неприродні пози, наприклад, викривлені або зігнуті, а також одноманітна діяльність, що веде до втоми, мають бути виключені. Повинна бути передбачена можливість зміни пози;

б) обладнання має бути сконструйоване так, щоб дозволити оператору вибирати робочі пози, що чергуються з сидінням, стоянням та ходінням. Сидіння загалом краще за стояння;

в) повинна бути передбачена основна необхідна поза та відповідні опори для тіла. Опори мають бути виконані за розмірами та положенням так, щоб уникати нестійкого становища тіла. Пози повинні відповідати зусиллям, що прикладаються. Технічні допоміжні засоби мають бути передбачені так, щоб забезпечити наявний зовнішній вплив та уникнути фізичних перевантажень. Для реалізації цих вимог для ручного робочого обладнання важливо

розмістити рукоятки керування так, щоб уникнути їхнього перехоплення в процесі роботи.

4.1.3. Рухи тіла

Робоче обладнання має бути сконструйоване так, аби рухи тіла або його частин відповідали природним ритмам та способам виконання. Особливо необхідно звернути увагу на те, щоб оператор не робив частих чи тривалих рухів із сильним поворотом суглобів.

При конструюванні робочого обладнання необхідно враховувати такі принципи:

а) при використанні робочого обладнання уникати нерухомих поз оператора;

б) робоче обладнання необхідно конструювати так, щоб уникати повторюваних (одноманітних) рухів, які можуть призвести до завдання шкоди, хвороби чи травм;

в) рухи, що вимагають високої точності, повинні виконуватись з мінімальним прикладанням зусиль;

г) для ручних рухів, що вимагають високої точності, необхідно застосовувати допоміжні засоби (наприклад, підйомники, напрямні, фіксатори тощо);

д) необхідно уникати докладання зусиль, при яких необхідне обертання або незручне становище суглобів рук та долоні.

4.1.4. Фізичне зусилля

Вимоги робочого обладнання до фізичних зусиль оператора при їх прикладанні мають бути раціональними (див. ЄП 1005-1, ЄП 1005-2, ЄП 1005-3). При взаємодії з органами керування зусилля залежать від: ваги, форми, величини, розподілу ваги та положення органів керування; від тривалості та частоти застосування зусиль; від пози оператора (сидяча або стояча) та від напрямку руху; від правил та методів роботи, а також від здібностей цієї групи операторів (наприклад, статі, віку, стану здоров'я, будови тіла та тренованості).

При конструюванні робочого обладнання необхідно враховувати такі принципи:

а) у разі, якщо необхідне зусилля не може бути забезпечено відповідною м'язовою групою, необхідно застосовувати механічні допоміжні засоби;

б) уникати тривалого статичного напруження м'язів (наприклад, робота рук над головою). Маса ручного інструмента при тривалому впливі може спричинити істотну втому м'язів, тому її вплив необхідно усувати, до прикладу шляхом підвішування;

в) для зменшення докладеного зусилля необхідно компенсувати силу тяжіння;

г) органи керування, рукоятки та педалі робочого обладнання повинні бути сконструйовані так, щоб докладене зусилля було мінімальним і не викликало шкідливого впливу на здоров'я або безпеку оператора;

д) залежно від необхідних зусиль, розміру, форми та положення органів керування необхідно уникати нерівномірного навантаження тіла та його частин.

Чим частіша та триваліша дія, тим більше вона має виконуватися у сидячому положенні оператора;

е) з урахуванням вимог щодо роботи з ручним робочим обладнанням, маса його має бути розподілена так, щоб була досягнута відповідна рівновага.

4.2. Конструювання з урахуванням розумових здібностей

З підвищенням рівня автоматизації технічних систем зменшуються вимоги до фізичних можливостей оператора та збільшуються вимоги до його розумових здібностей (сприйняття та обробка інформації). Робоче обладнання має бути сконструйоване так, щоб враховувалися розумові здібності оператора, не погіршувалося його здоров'я та безпека, а також підвищувалася ефективність робочої системи. При конструюванні необхідно враховувати таке:

а) робоче обладнання має бути сконструйовано так, щоб його використання не перенавантажувало розумові здібності оператора;

б) інформація, необхідна до виконання робочого завдання, має бути представлена так, щоб оператор міг її легко сприйняти;

в) інформація для оператора має бути подана так, щоб він легко її зрозумів і застосував у роботі, тобто йому має бути надана можливість огляду як усієї робочої системи, так і окремих параметрів;

г) у взаємодіючих системах мають бути забезпечені аналогічні розташування та призначення умовних зображень, символів та команд.

4.3. Конструювання індикаторів, сигнальних пристроїв та органів керування

4.3.1. Індикатори та сигнальні пристрої

Індикатори та сигнальні пристрої повинні бути сконструйовані, підібрані та розміщені так, щоб вони узгоджувалися з особливостями людського сприйняття та з виконуваним завданням (див. ЄП 894-1 та ЄП 894-2).

Особлива потреба у врахуванні такого:

а) індикатори та сигнальні пристрої мають бути сконструйовані так, щоб гарантувати їх ясне та однозначне сприйняття. Це стосується насамперед аварійних індикаторів та сигнальних пристроїв. При цьому необхідно взяти до уваги інтенсивність, тривалість сигналу, колір, форму, величину, контрастність, а також перевищення над фоновим – оптичним та звуковим. При сигналі тривоги вплив посилюється, якщо звуковий та оптичний сигнали діють сумісно;

б) щоб уникнути інформаційної надмірності, необхідно обмежити кількість та типи індикаторів та сигналів, необхідних для виконання завдання, до необхідного мінімуму;

в) індикатори та сигнальні пристрої мають бути сконструйовані так, щоб надати оператору ясну та однозначну інформацію, непотрібної інформації необхідно уникати;

г) індикатори та сигнальні пристрої мають бути розташовані так, щоб було можливе надійне, однозначне та швидке орієнтування та розпізнавання. При цьому необхідно враховувати важливість та частоту окремих елементів

інформації, а також зворотний зв'язок у межах робочого завдання. Форма та зміст цієї інформації повинні бути однозначними і добре відомими оператору. Форма та змінюваність інформації повинні відповідати відповідним вимогам.

4.3.2. Органи керування

Органи керування та їх функції мають бути сконструйовані, обрані та розташовані так, щоб вони відповідали фізіологічним особливостям людини (особливо її можливостям руху) та частинам його тіла (рукам, пальцям, ногам або іншим частинам тіла), які беруть участь у керуючих діях. При цьому необхідно враховувати швидкість та точність зусиль, а також вимоги до їх застосування. Правильна конструкція органів керування веде до зменшення помилок людини (див. ЄН 894-3).

При конструюванні необхідно враховувати таке:

а) тип конструкції та розташування органів керування повинні відповідати робочому завданню;

б) органи керування повинні бути сконструйовані та розташовані так, щоб звести до мінімуму небезпеку для здоров'я та життя оператора з урахуванням можливості нещасних випадків, частоти використання і т. д. Для ручних машин найважливіші органи керування повинні бути розташовані так, щоб оператор міг впливати на них, не відпускаючи рукояток;

в) робочий хід та робоча протидія органів керування необхідно вибирати залежно від робочого завдання та фізіологічних особливостей оператора, на основі біомеханічних та антропометричних даних;

г) функції органів керування повинні легко розрізнятися, щоб уникнути переплутування з іншими схожими чи сусідніми органами керування;

д) розташування та рух органів керування, їх дія та пов'язана з ними інформація повинні однозначно відповідати один одному;

е) органи керування, особливо пристрої для пуску, повинні бути обрані, сконструйовані та розташовані так, щоб виключити непередбачуваний вплив;

є) при зміні оператором однієї машини на іншу, схожого типу та аналогічних функцій, органи керування повинні бути розташовані так, щоб виключити плутанину та зменшити кількість помилок;

ж) пульт керування має бути сконструйований щодо форми, положення та блокувань так, щоб унеможливити людські помилки;

з) кількість органів керування має бути зведена до необхідного мінімуму. Органи керування повинні бути розташовані так, щоб необхідні за робочим завданням їх положення досягалися ясно та однозначно. Для досягнення цього необхідно враховувати розташування, важливість та частоту окремих рухів.

4.4. Взаємодія з фізичними робочими умовами

При конструюванні робочого обладнання необхідно враховувати вплив будь-яких емісій, що виділяються обладнанням, на оператора та робочі умови відповідно до ***ДСТУ ІСО/ТО 12100-1*** та ***ДСТУ ІСО/ТО 12100-2***.

4.4.1. Шум та вібрація

Рівні звукового тиску та параметри вібрації на робочих місцях, що виникають під час роботи обладнання, не повинні перевищувати допустимих параметрів. Методи конструювання мають бути спрямовані на зменшення впливу цих факторів у зоні їх виникнення.

4.4.2. Теплове випромінювання

Теплове випромінювання, що виникає при роботі робочого обладнання, має бути зведено до мінімуму. Особливо необхідно враховувати:

а) необхідні фізичні робочі навантаження оператора;

б) теплові властивості одягу;

в) очікуване теплове навантаження на оператора;

г) температуру поверхонь, до яких торкається оператор у процесі роботи (див. ЄП 563).

4.4.3. Освітлення

Освітлення має сприяти виконанню робочого завдання. Якщо аналіз завдання показує, що навколишнього освітлення недостатньо, необхідно передбачити додаткове місцеве освітлення, наприклад, для встановлення та регулювання обладнання. Освітлення має бути організоване так, щоб виключити прийняття оператором неприродних поз. При використанні регульованого освітлення засоби регулювання повинні бути зручно розташовані й не повинні наражати на небезпеку оператора.

Особливо необхідно враховувати такі фактори:

а) уникати мерехтливого світла;

б) уникати затемнення або надто сильної освітленості;

в) уникати утворення тіней;

г) уникати стробоскопічного ефекту;

д) контраст має бути співрозмірним з робочим завданням;

е) має зберігатися перенесення кольорів.

4.4.4. Небезпечні матеріали та випромінювання

Робоче обладнання має бути сконструйоване так, щоб при його роботі виділення будь-яких небезпечних речовин та випромінювання були позначені та відповідними пристроями ізольовані, щоб їх параметри не перевищували допустимих меж.

4.5. Взаємодії у процесі роботи

Вид та спосіб керування робочим обладнанням, а також поділ функцій між оператором та робочим обладнанням мають особливе значення для забезпечення взаємодії між цими різними елементами.

Особливо необхідно враховувати таке:

а) складові частини робочого обладнання повинні бути розташовані так, щоб сприяти ефективному виконанню робочого завдання та збереженню здоров’я, забезпеченню безпеки та гарного самопочуття оператора. Наприклад,

відстань між частинами робочого обладнання має бути такою, щоб був необхідний простір для проходу операторів та переміщення матеріалів, а також забезпечувалися можливості для спостереження;

б) способи транспортування допоміжних засобів і матеріалів повинні бути сконструйовані так, щоб звести небезпеку до мінімуму;

в) робоче обладнання має бути розташоване так, щоб виключити небезпеку для оператора, що походить від сусіднього робочого обладнання;

г) при розташуванні індикаторів на органах керування має бути забезпечене отримання оператором від цих індикаторів чіткої та однозначної інформації, при цьому індикатор та орган керування повинні відповідати один одному;

д) робочий ритм рухів оператора не повинен бути пов'язаний з циклами напівавтоматичної або автоматичної машини, або транспортного конвеєра. Незалежність дій оператора може бути забезпечена додатковим оснащенням, роботом тощо;

е) ручне робоче обладнання має бути сконструйовано так, щоб воно за розмірами, масою та формою відповідало анатомії руки і дозволяло оператору виконувати природні рухи при його використанні;

ж) можливість виконання оператором операцій зліва та праворуч;

з) оскільки конструктори наперед знають фактори впливу на довкілля при використанні обладнання, то це теж має враховуватися.

5. Застосування ергономічних принципів у процесі конструювання

Конструювання робочого обладнання може бути описано при застосуванні системного моделювання як методологічний процес, а такі основні завдання, як визначення мети, встановлення вимог та оцінка, є складовими частинами цього процесу. При цьому необхідно враховувати основні конструктивні та людські фактори. Процес конструювання можна розбити на чотири етапи:

1. Розробка та уточнення технічних вимог.
2. Розробка попереднього конструкторського проєкту (або проєктів).
3. Розробка детального конструкторського проєкту.
4. Виконання.

На етапі 1 розробляють та уточнюють відповідні системні вимоги до створення переліку виконуваних функцій. На етапі 2 конструктор розробляє ескізну документацію доти, поки не сформована концепція подальшої роботи. На етапі 3 конструктор продовжує розробку проєкту до отримання результатів, на основі яких можна створити робочу конструкторську документацію. На етапі 4 конструктор уточнює останні деталі та створює остаточний проєкт.

Оператор повинен брати участь у цьому процесі якомога раніше.

5.1. Виконання задач ергономіки

Ергономічні завдання у процесі конструювання виконують відповідно до таблиці 1. На кожній стадії цього процесу виконують комбінації цих завдань. При цьому глибина аналізу повинна відповідати етапу конструювання.

5.2. Розробка вимог до конструювання відповідно з ергономічними принципами

5.2.1. Розробка та уточнення вимог

Конструювання робочого обладнання залежить від робочого процесу та виконуваних завдань. При цьому робоче обладнання є складовою робочого процесу. Початкові вирішення питань конструювання мають бути оцінені з погляду технічних вимог. Щоб використовувати переваги ергономічних принципів конструювання, необхідно ще на ранній стадії розробки враховувати вимоги оператора (див. пункти 1 і 2, табл. 1).

Таблиця 1

Виконання ергономічних завдань у процесі конструювання

Ергономічне завдання

Опис завдання

1. Встановлення та уточнення технічних даних

Встановлення вкладу ергономіки під час створення ефективної, надійної та безпечної системи.

2. Визначення групи операторів

Визначення специфічних особливостей операторів, які використовують робоче устаткування.

3. Проведення аналізу завдання

Поділ функцій між оператором та робочим обладнанням. Встановлення завдання для оператора (наприклад, вплив на органи керування, завантаження машини). Розділ завдання на окремі складові частини, щоб для кожного оператора визначити необхідність впливів на органи керування в межах певного відрізка часу (наприклад, спостереження відхилення стрілки, встановлення органів керування у задане положення).

4. Встановлення необхідних ергономічних даних

Встановлення ергономічних даних для оцінки певного проєкту за допомогою аналізу завдання. Наприклад, пункт 3 міг би вказувати на необхідність встановлення подальших вимог при конструюванні індикаторів (наприклад, можливість читання, точність та розташування); при розміщенні індикаторів та органів керування (які дозволяють оператору зберігати ефективну та природну позу) та при конструюванні органів керування (обмеження зусиль, що застосовуються оператором, виключення випадкового натискання). Ергономічні принципи, які необхідно враховувати для визначення необхідних даних, наведені в розділі 4.

5. Визначення необхідної документації

Визначення інформації, яка має бути наведена в документації для оператора, наприклад, у посібнику з керування та обслуговування.

6. Визначення вимог щодо навчання

Врахування результатів аналізу завдання з метою визначити особливі вимоги щодо навчання оператора на робочому обладнанні, а також вплив на безпеку (наприклад, використання стимулів для навчання, щоб уникнути помилок оператора).

7. Вибір методу оцінки

Визначення методу оцінки результату за пунктом 4 у порівнянні з вимогами наявного проекту, наприклад, застосування стандартів, комп'ютерні способи конструювання, моделювання робочого завдання та робочих умов.

8. Оцінка обраного проєкту

Застосування обраних методів згідно з пунктом 7 з метою визначення відповідності ергономічних вимог проекту заданим умовам (на основі даних, отриманих у пункті 4).

9. Оцінка результатів аналізу

Рішення, чи може бути досягнуто компромісу між конструкторсько-технічними та ергономічними вимогами, якщо ж ні, то визначити, чи не варто повторити вимоги пунктів 3-7 частково або повністю у новому переробленому проєкті.

10. Оцінка за участю оператора

Застосування масштабних чи натурних моделей робочого обладнання або його частин чи застосування макетів, щоб оцінити проєкт спільно з оператором та по можливості визначити обсяг роботи. Це має містити оцінку будь-якої документації.

11. Оцінка результатів практичного досвіду оператора та зміни проєкту

Нова оцінка проекту з урахуванням змін, отриманих на основі практичного досвіду оператора та, за потреби, повторення вимог пунктів 3-10.

5.2.2. Розробка попереднього проекту

Початкова деталізація вимог оператора має враховувати:
- результати аналізу діяльності оператора на зміненій машині або, у разі нової машини, на машині-аналозі;
- відповідність функцій робочого обладнання та оператора;
- робочі завдання, які має виконувати оператор на робочому обладнанні;
- взаємодія між оператором та робочим обладнанням.

Вимоги повинні бути оцінені відповідно до ергономічних принципів, викладених у розділі 4. Результати оцінки необхідно класифікувати за ступенем їх прийнятності, наприклад, шляхом застосування такої системи оцінки, як

тризонна модель (див. додаток А). Якщо вимоги оператора лежать поза ергономічно прийнятними межами, потрібна конструкторська переробка проєкту (див. пункти 3–9 табл. 1). Якщо розумний компроміс між технічними та ергономічними вимогами недосяжний, необхідно вжити інших заходів, наприклад, розробити інструкції оператору про найоптимальніші методи роботи з робочим обладнанням.

5.2.3. Розробка детального проєкту

Цей етап передбачає глибоке опрацювання обраного конструкторського рішення, а також визначення детальних конструкторських даних. Щоб гарантувати, що у детальному проекті враховані вимоги конструкторів та операторів, необхідно взяти до уваги розділ 4. При цьому потрібно враховувати такі фактори, як задоволеність роботою та організаційними результатами. При цьому необхідно провести аналіз робочого завдання, щоб встановити оптимальну взаємодію між оператором та робочим обладнанням і врахувати це у проєкті.

Примітка.

Аналіз завдання дозволить конструктору точно визначити обсяг роботи оператора. Крім того, він може на основі цього аналізу вирішувати, яку інформацію необхідно надавати оператору. Детальний проєкт повинен опрацьовуватися доти, поки не буде остаточного конструкторського рішення з точними технічними характеристиками. Після розробки конструкторського рішення необхідно розробити необхідну документацію. Документація повинна містити інформацію для оператора про ергономічне використання робочого обладнання.

5.2.4. Виконання

Проведення практичних експериментів за участю оператора рекомендується для того, щоб встановити, чи потребує конструкція подальшого поліпшення (див. пункти 10-11 таблиці 1). Практичні експерименти із застосуванням масштабних чи натурних моделей можуть виявити можливі помилки конструювання, а також надати конструктору можливість провести вдосконалення на основі досвіду оператора. Такі експерименти дуже важливі з економічної точки зору, оскільки дозволяють уникнути подальших вдосконалень під час виробництва.

Розробка документації (включаючи інструкції для операторів) може виконуватися на практичних експериментах при взаємодії з оператором, причому зміни проводять на основі думки оператора. Після закінчення практичних експериментів і після врахування отриманих при конструюванні машини знань, як для цієї, так і для майбутніх машин такого ж типу, можна остаточно конструювати інші деталі компонування і оформляти остаточну документацію.

Примітка.

Рекомендується переглядати робоче обладнання та документацію з певною періодичністю, наприклад, через рік.

Цей текст ідентичний тексту європейського стандарту *ЄН 614-1-95 «Безпека обладнання. Ергономічні засади конструювання. Частина 1. Терміни, визначення та загальні принципи».*

8. Внутрішня геометрична структура

[21–24, 36, 49, 54, 62–67]

Внутрішня структура – сукупність складових елементів – елементної бази виробу, та зв'язків поміж ними, побудованих відповідно до функціональної ідеї приладу.

Функції внутрішньої структури:

1. Забезпечення виконання основного призначення виробу.
2. Забезпечення комунікації з користувачем.
3. Забезпечення монтажу елементної бази виробу в обмеженому просторі – складання та установка.

Цей розгляд присвячений третьому чиннику функцій внутрішньої структури – складанню та установці.

8.1. Преамбула

8.1.1. Функціональна класифікація

1. Прилади з гнучкими зв'язками – електронні прилади [21, 22, 23].

Прилади будуються за модульним принципом, на базі несучих конструкцій, розглянутих нижче. Схема складання – віяльна, рис. 8.1.

1. Прилади з жорсткими зв'язками функціональних елементів [24, 63–65].

Прилади з послідовними або послідовно-паралельними функціональними зв'язками отримали назву *централізованих систем.* Це механічні та оптико-механічні системи, складання та компоновка яких здійснюється на спільній базі (корпусі) (рис. 8.2), переважно відлитому з металу (чавун, силумін). За цією схемою побудовані фотометри, спектрофотометри, гоніометри тощо. В таких приладах електронні модулі, при їх наявності, не виконують функціональних перетворень. Їх призначення – забезпечення роботи виробу; наприклад, як підсилювачі, системи реєстрації, блоки живлення, системи термостабілізації.

2. Прилади з гнучкими зв'язками жорстких елементів [24].

Гнучкість забезпечується, якщо у функціональну схему перетворень включений електромеханічний чи електронний модуль як елемент перетворення; тоді система отримує нову якість – здатність бути дистанційно керованою – телеметричні властивості. Такі прилади можуть компонуватись як у спільному корпусі, так і за модульним принципом, у декількох корпусах.

4. Компонувальна схема із центральним функціональним модулем (автор).

«Серцем» цих систем є центральний функціональний модуль; наприклад, світломірна фотометрична сфера, вмонтована у вимірювальний комплекс окремо, або корпус калориметра тощо). Інші комплектуючі – підсилення та обробка сигналу, системи реєстрації – це стандартні модулі, запозичені з наявного арсеналу виробів приладобудування.

Конструкція цих систем комбінована, будується як за базовим елементом, так і за модульним принципом.

8.1.2. Принципи складання та ієрархія* розбудови

Розрізняють два види конструкцій.

І. Блочно-модульні конструкції, складені за віяльним принципом (рис. 8.1)

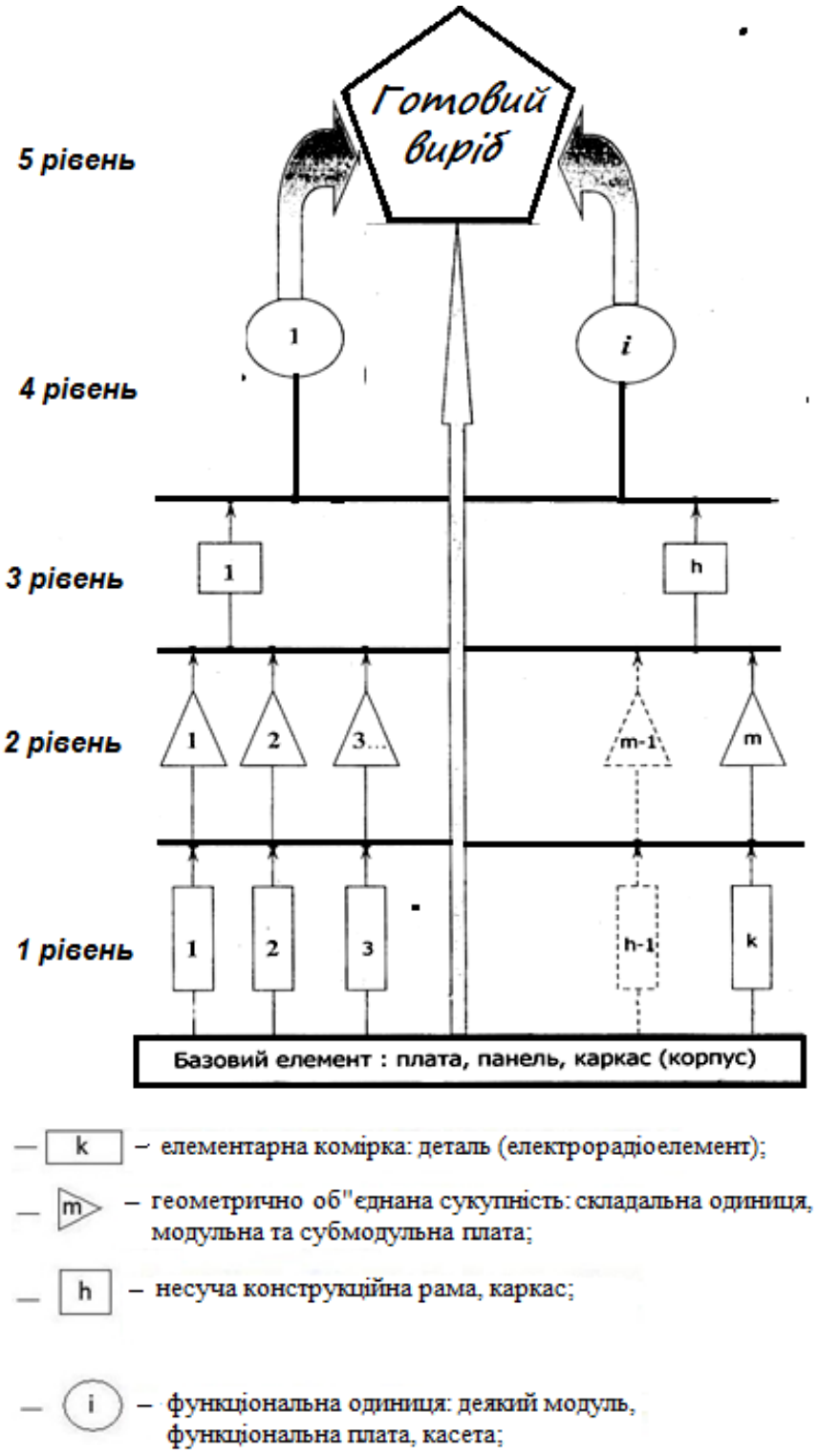


Рис. 8.1. Блочно-модульні конструкції: схема складання виробів за віяльним принципом; ДСТУ *ГОСТ 25122—82*

II. Моноблочні конструкції зі спільною базою; послідовний або послідовно-паралельний принцип складання за базовим елементом

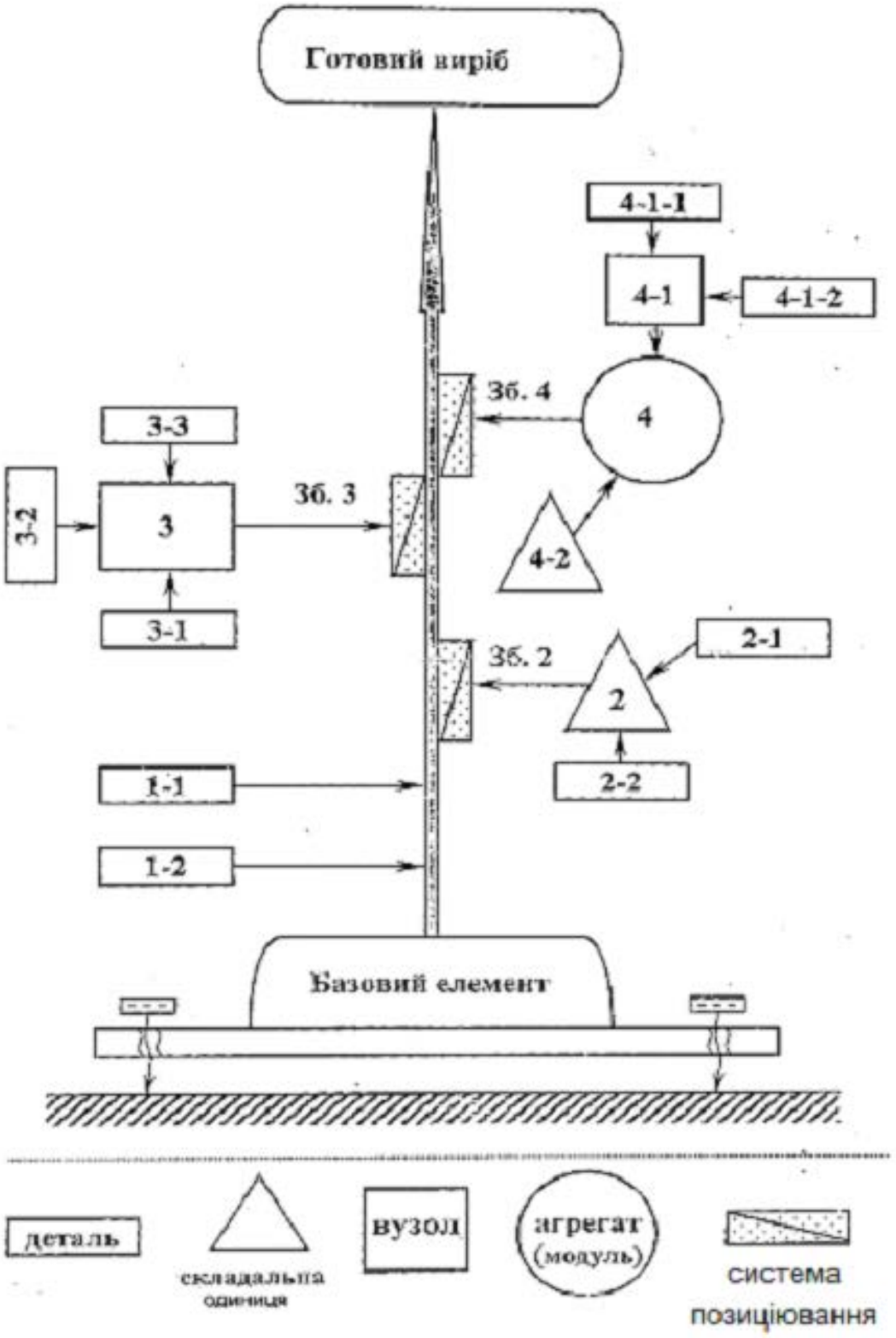


Рис. 8.2. Моноблочні конструкції: схема складання виробів за базовим елементом

*Ієрархія [гр.. hieros (священний) + arche (влада)]: 1) розташування частин або елементів цілого в порядку від вищого до нижчого; 2) розміщення службових звань або чинів в порядку їх підлеглості.

Конструктивні елементи, які забезпечують монтаж елементної бази:

станина, каркас, рама, пластина, стержень.

За даною схемою складаються два функціональних види приладів (див. «функціональна класифікація»).

Перший. *Централізовані системи* з послідовними або послідовно-паралельними функціональними зв'язками жорстких елементів.

Другий. *Прилади з гнучкими зв'язками* жорстких елементів; гнучкість забезпечується, якщо у функціональну схему перетворень включений електромеханічний чи електронний модуль як елемент перетворення, тоді система отримує нову якість – здатність бути дистанційно керованою – телеметричні властивості. Такі прилади можуть компонуватись як на спільній базі, так і за нижче розглянутим модульним принципом (блочно-модульні конструкції).

8.2. Блочно-модульні конструкції

Блочно-модульні конструкції – це переважно конструкції електронних приладів з віяльним принципом складання (рис. 8.1), які будуються з функціональних блоків, так званих модулів*, здатних самостійно виконувати частинні функції. Будуються на базі *несучих конструкцій*, уніфікованих за розмірами і оформлених у стандарти. В основі стандартизації лежать Міжнародні стандарти Міжнародної електротехнічної комісії (МС МЕК), які забезпечують як міжнародну кооперацію, так і інтеграцію виробництв.

За сучасними принципами вироби радіоелектроніки будуються за модульним принципом на уніфікованому каркасі – функціонально завершений конструктивний вузол, який отримав назву «несуча конструкція» [21-23].

*Примітка. Модульний принцип побудови властивий збірним системам, які називають також *агрегатами*.

8.2.1. Несучі конструкції

Під *несучою* конструкцією розуміють як металевий корпус, так і каркас, шасі або раму. Каркас може бути відлитим з легких сплавів або зібраний зі штампованих тонких профільних металевих смужок, відповідно сполучених. На сьогодні переважно використовуються роз'ємне з'єднувальні конструкції з уніфікованих конструктивних профілів відповідно до ДСТУ ГОСТ 25122-82 «Конструкції базових технічних засобів». Вимоги оптимізації конструювання несучих конструкцій сформували систему під назвою «Єдина система типових несучих конструкцій» (ЄСТНК), яка поширюється на електричні та електронні прилади і апарати. Названі вироби характеризуються високим коефіцієнтом споріднення та повторювальності елементної бази, що й відкрило можливість уніфікувати посадкові зони цієї бази. Окрім цього, ще один фактор, що сприяє названій уніфікації, – це можливість чіткого розмежування у функціональній структурі приладів і апаратів систем забезпечення, надійності, захисту їх

роботи, а також засобів комунікацій, що і відкрило можливість створення стандартів у галузі.

Єдина система типових несучих конструкцій включає такі модулі:

- *Внутрішні несучі модулі* – різноманітну елементну базу, яка виконує функції установки, починаючи з простих друкованих плат, а далі – до всувних блоків, великих стояків, пультів керування.
- *Зовнішні несучі модулі* – різні упорні ніжки, ручки для переносу, елементи кріплення на лицевій і задній панелях корпусів приладів, − деталі, які виконують функцію установки.
- *Модулі*, які виконують *функцію захисту* – корпуси приладів або інших виробів.

Принципи конструювання контрольно-вимірювальної апаратури в приладобудуванні містить ДСТУ ОСТ 4 ГО. 410.001, який поширюється на типові елементи конструкцій корпусів. В основі сумісного використання модулів в рамках міжнародного співробітництва лежать Міжнародні стандарти Міжнародної електротехнічної комісії, наприклад, МС МЕК 279, МС МЕК 516 та ін. На теренах нашого виробництва впровадження рекомендацій МС здійснено у низці стандартів Єдиної системи стандартів приладобудування ЄССП ДСТУ ГОСТ 26.202-81 «Засоби вимірювань і автоматизації. Панелі і стояки».

8.2.2. Принцип віяльного складання

[21–23]

8.2.2.1. Ієрархія розбудови електронних приладів

Представлена на рис. 8.1 схема побудована за регламентаціями ДСТУ ГОСТ 25122 - 82 «Конструкції базових технічних засобів», яка встановлює для технічних засобів Єдиної системи ЕВМ градацію конструктивних модулів за рівнями:

*перший рівень** – електро-радіоелемент, корпус інтегральної схеми;

другий рівень – група попередніх елементів, об’єднаних складальними операціями (модуль, мікромодуль); вони отримали назву типових елементів заміни (вставна плата тощо);

третій рівень – каркас, рама, шасі, призначені для монтажу попередніх складальних груп;

четвертий рівень – група модулів та мікромодулів, об’єднаних складальними операціями, які виконують завершену функцію; разом з лицевою панеллю формує функціональний образ приладу;

п’ятий рівень – готові до експлуатації вироби електроніки; це як окремі прилади, так і більш складніші системи: пульти керування, стояки, шафи, які об’єднують групу окремих блоків, або навіть приладів у складний комплекс, який контролює, керує технологічними процесами або комплексом дослідницьких процесів.

*Примітка. *Подекуди елементну базу електроніки відносять до нульового рівня.*

Розбудова блочно-модульних конструкцій паралельна, складання здійснюється незалежно, по кожному з рівнів.

Прилади цієї конструкції будуються з окремих складових частин, які, як вже зазначалось, називають ***модулями***. *Модуль* приладу можна визначити як уніфікований конструктивний елемент за функціональною ознакою, розміром або матеріалом. *М.* переважно виконує самостійну частинну функцію; виготовлення і контроль на функціональність окремих модулів незалежні; названі процедури можуть бути рознесені як в часі, так і по різних виробничих територіях або навіть заводах.

Стандартні модулі – комірки, блоки, стояки, шафи – конструктивно завершені складальні одиниці з самостійними властивостями та призначенням, володіють властивостями сумісності (спряження) і підлягають Єдиній системі приєднувальних та геометричних розмірів.

Конструктивна градація рівневих структур відповідно до схеми складання за модульним принципом показана на рис.8.3.

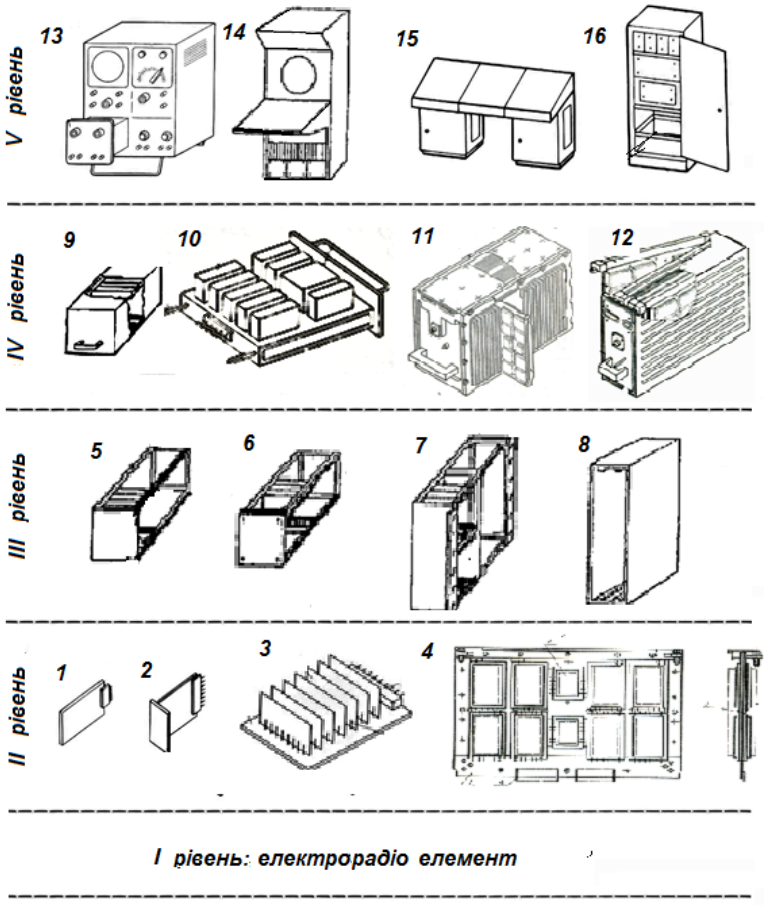


Рис. 8.3. Рівнева градація модульного принципу конструювання електронних засобів *(відповідно до рис.8.1)**:***
1, 2 – мікромодулі (комірки); 3 – субмодуль; 4 – електронний модуль ЕМ1; 5, 6 – блочні каркаси; 7 – контейнер; 8 – захисний кожух; 9 – висувний блок; 10 – модульний блок; 11,12 – модульні блоки ЕМ2 вставної та книжної конструкції; 13 – прилад із функціональними змінними блоками; 14 – пульт; 15 – стіл тумбовий; 16 – шафа висувних приладів

8.2.2.2. Основні переваги блочно-модульних конструкцій

- Можливість зміни загальної *ФПС* шляхом зміни окремих модулів.
- Можливість створення систем різних типів шляхом комбінування окремих блоків.
- Можливість швидкого вдосконалення приладу, здійснюючи модифікацію наявних або ж розробку нових модулів.
- Спрощення технічного обслуговування і ремонту шляхом швидкої заміни блоків, що вийшли з ладу. Останні стикуються за допомогою роз'ємних з'єднань.
- Спрощення технології виготовлення шляхом спеціального виробництва, складання і випробування окремих блоків.

Головна особливість та перевага модульного виконання – швидкий монтаж (складання) та швидкий ремонт приладу шляхом заміни аварійного модуля, який називають *типовим елементом заміни*.

8.2.3. Електронні вироби в модульному виконанні [24, 40]

ДСТУ ОСТ 4 Го. 010.009–84 встановлює електронні модулі першого *(ЕМ1)* та другого рівнів *(ЕМ2)* радіоелектронних пристроїв [21], а також норми і вимоги з їх конструювання, які розробляються на основі використання базових несучих конструкцій *(БНК)*. На рис. 8.4 подана конструкція *ЕМ1*, побудована на основі друкованої плати *(ДП)*, до якої кріпляться металеві шини 3. Безкорпусні мікрозбірки 2 безпосередньо установлюються на ці шини з обох сторін *ДП*. До торця однієї з її сторін, використовуючи металеві шини, закріплена притискна планка з деяким «вушком» кріплення *ЕМ1* до *ЕМ2* невипадними гвинтами.

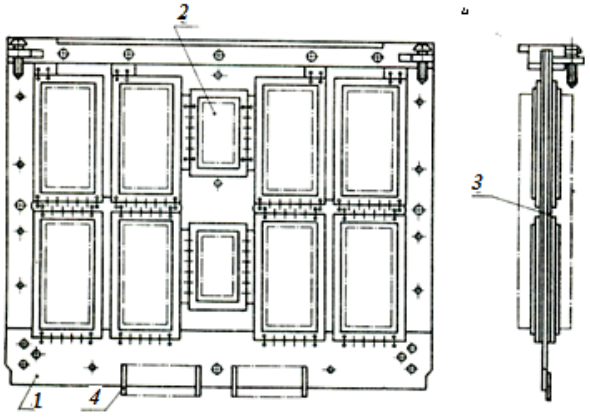


Рис. 8.4. Конструкція електронного модуля ЕМ1:

1 – основа *ЕМ1*;
2 – безкорпусна мікрозбірка;
3 – металева шина;
4 – електричні з'єднувачі

При конструюванні *ЕМ2* використовується вставний (рис.8.5) або книжний (рис.8.6) принцип монтажу *ЕМ1* в герметичному або негерметичному виконанні. Корпус *ЕМ2* вставної конструкції відлитий з легкого металу, його герметичність забезпечується гумовими прокладками, встановленими під бокові стінки. Тут складові *ЕМ1* розташовані паралельно передній панелі.

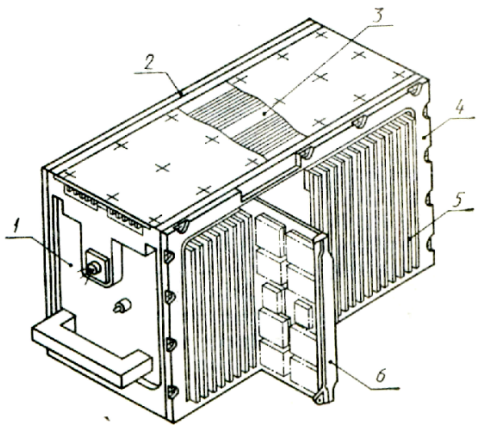


Рис. 8.5. Модуль ЕМ2 вставної конструкції:
1 – передня панель;
2 – бокова стінка;
3 – об'єднувальна друкована плата;
4 – задня панель;
5, 6 – модульні плати ***ЕМ1***

ЕМ2 книжної конструкції показаний на рис. 8.6. Модульні плати розташовані перпендикулярно передній панелі, вісь розкриття – вертикальна. Корпус зварний, бокові стінки виготовлені з ребрами жорсткості, герметизація забезпечується паянням. На передній панелі 1 розташовані електричні роз'єми, штуцер для відкачування повітря. Внутрішні електричні з'єднання виконані за допомогою гнучких плоских кабелів та комутаційної об'єднувальної *ДП*.

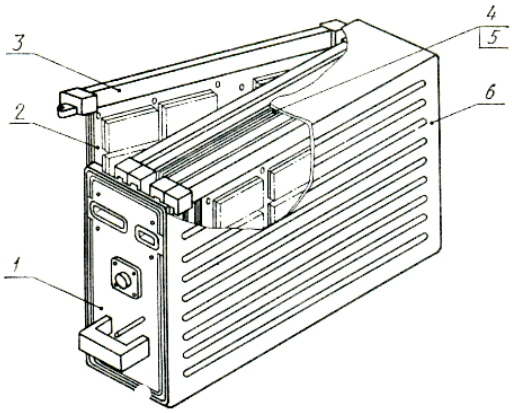
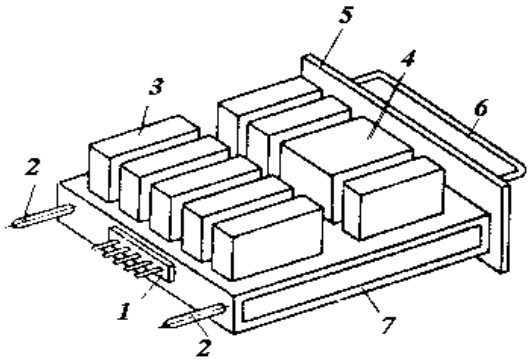


Рис. 8.6. Модуль ЕМ2 книжної конструкції:

1 – передня панель;
2 – ЕМ2;
3 – повітряний провід;
4 – комутаційна друкована плата;
5 – гнучкий плоский кабель;
6 – бокова стінка (кожух)

Електронний модульний блок на уніфікованому каркасі (рис.8.7) являє собою конструктивний вузол, призначений для виконання самостійної функції (блок живлення, блок підсилення електричних величин та ін.).

Рис. 8.7. Електронний модульний блок:
1 – роз'єм;
2 – напрямні штирі;
3, 4 – модулі;
5 – лицева панель;
6 – держак;
7 – шасі (каркас)



Уніфікація каркаса відкриває можливість установки та закріплення в ньому різноманітних складових частин. Незалежно від функціонального призначення, у названий блок входять такі складові: несуча конструкція шасі *7*, ручка *6*, лицева панель *5*, функціональні електронні модулі *3,4*, напрямні штирі *2*, роз'єми *1*.

В електронних виробах у спеціальних випадках поширене застосування модульних вузлів, у конструкцію яких включають так названі мікромодулі (рис. 8.8) і *друковані електронні плати* стандартних розмірів – рис. 8.9, і як *типові* елементи заміни.

Переважно ці структури виконують самостійні функції, *є джерелом підвищених ризиків надійності*, що й послужило аргументом у виділення їх в окремі швидкозмінні конструктивні одиниці.

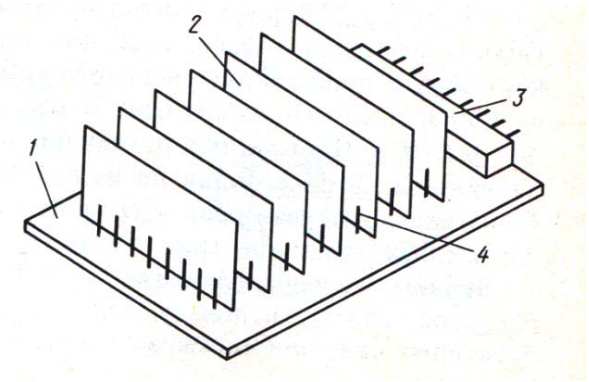
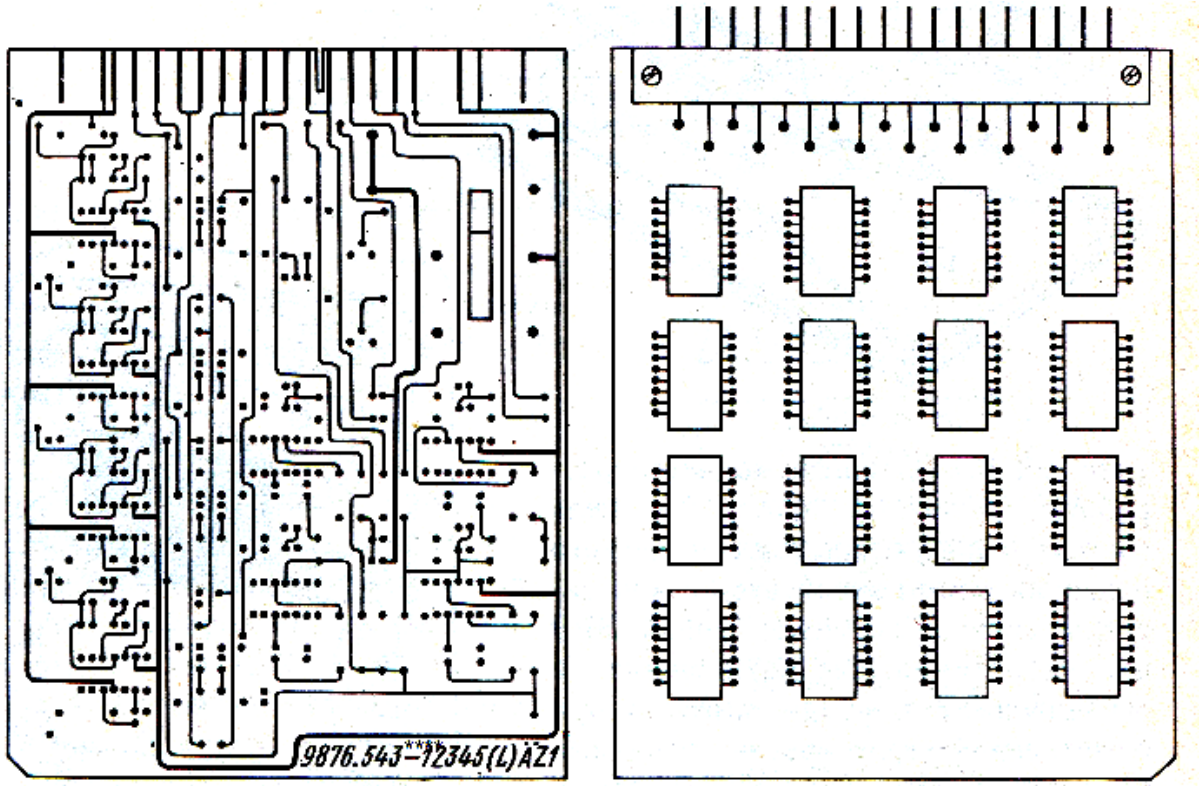


Рис. 8.8. Мікромодуль друкованих електронних вузлів:

1 – монтажна друкована плата;
2 – модульна електронна комірка;
3 – штирковий електричний з'єднувач;
4 – контактні штирки



а *б*

Рис. 8.9. Друковані електронні плати як типовий елемент заміни (ремонтний) *[2]* **:**
а – з електричним з'єднанням прямого спряження;
б – колодкове штиркове електричне з'єднання

*Цифрові маркери – цифровий шифр елементної бази виробу

8.2.4. Електромонтаж

Компактність монтажу електроніки, якість передачі інформації у багатьох випадках залежить від способу розведення *комутуючих* провідників між електронними компонентам, в тому числі платами; розроблені різні варіанти.

Вільний електромонтаж (рис.8.10) укладається по найкоротшому шляху між точками з'єднання окремих компонент; ефективний для високочастотного обладнання, позаяк дозволяє понизити ємнісні та індуктивні зв'язки.

Кабельний електромонтаж (рис.8.11) – упорядковане розведення дротів, пов'язаних у джгут нитками або електроізолюючими стрічками тощо. Різновидом к*абельного* є *канальний* монтаж, при якому дроти укладаються у пластмасові або металеві канали прямокутного чи круглого перетину. Перевагами джгутового монтажу є простота і наочність розведення дротів, недолік – ємнісні та індуктивні зв'язки між провідниками в джгуті.

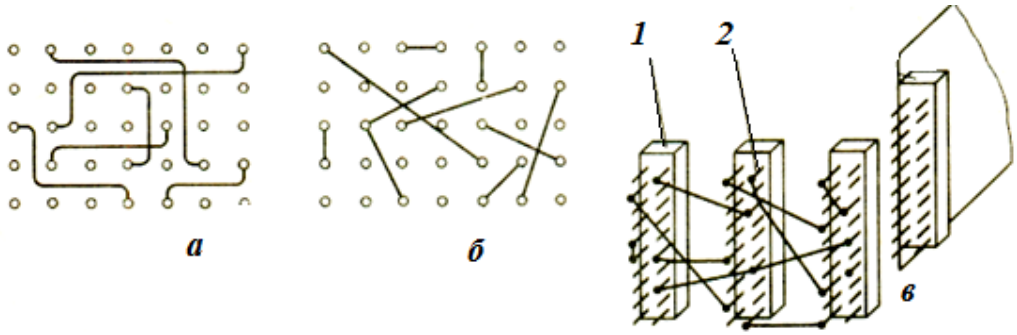


Рис. 8.10. Вільний електромонтаж:
а – загальний випадок;
б – дротами мінімальної довжини;
в – з'єднання штирів;
1 – розеткова частина електричного з'єднувача;
2 – штиркова частина електричного з'єднувача (хвостовик);

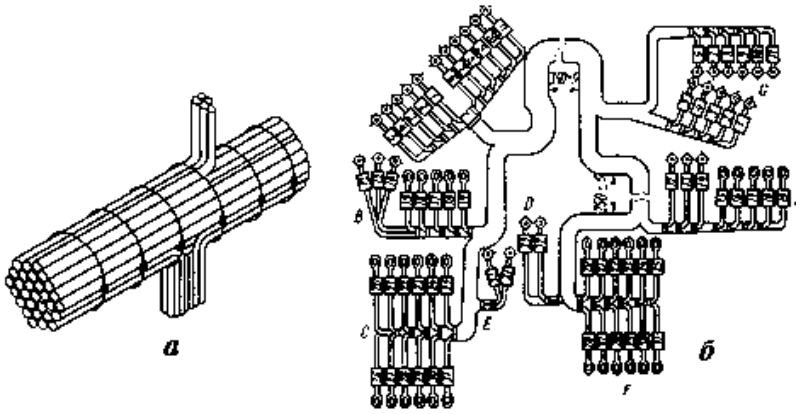


Рис. 8.11. Кабельний джгут, пов'язаний ниткою (а) та електромонтаж (схема розведення) формованого джгута (б) [2]

Стрічковий кабель (рис. 8.12). Окремі дротини з пластиковою ізоляцією проклеєні у плоску стрічку (*а*); завдяки гнучкості такі кабелі використовуються для з'єднань рухомих вузлів (*б*).

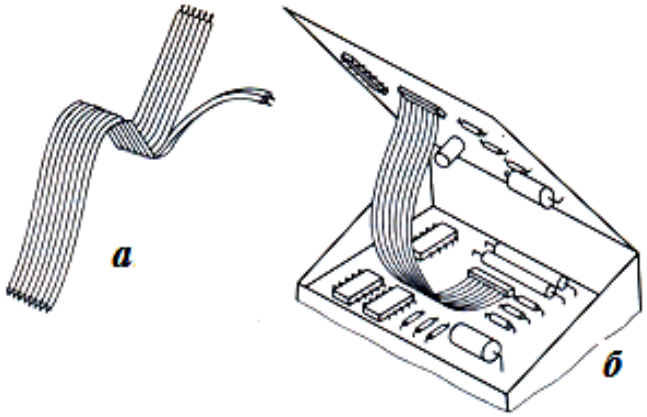


Рис. 8.12. Стрічковий кабель

як сукупність плоско склеєних пластиковою ізоляцією дротів *(а)*; гнучке з'єднання стрічковим кабелем функціональних вузлів *(б)*

Яскравим прикладом блочно-модульного принципу побудови електронних виробів є конструкція комп'ютера та його складових: моніторів, клавіатур, мишки.

8.3. Прилад зі спільною базою: моноблочні конструкції

8.3.1. Класифікація

Моноблочні конструкції з спільною базою за функціональними ознаками поділені на дві групи.

- Тип А: 1) послідовне перетворення сигналу однорідної фізичної природи; Приклад – спектрофотометр СФ-18, рис.8.13 [24].
- Тип Б: послідовно-паралельне перетворення сигналу з однорідним або комбінованими фізичними положеннями, закладеними в основу роботи; Приклад: мікроінтерферометр МИИ-4, рис. 8.14 [66].
- Тип В: Системи з ***центральним функціональним модулем;*** Приклад: альбедометр, призначений для світлових вимірювань дифузних матеріалів (білизна, колір) . «Серцем» приладу є центральний функціональний модуль – світломірна фотометрична сфера; змонтована у вимірювальний комплекс окремо. Інші комплектуючі – підсилення та обробка сигналу, системи реєстрації – це стандартні модулі, запозичені з наявного арсеналу виробів приладобудування.

Структура приладів типу А не розбивається на окремі функціональні вузли; в ході складання конструкція послідовно нарощується до повного завершення. Складання приладів типу Б здійснюється окремими попередньо зібраними вузлами. Складальний процес обох типів комбінований, демонструється схемою рис. 8.2.

8.3.2. Характеристика

Застосовується моноблочний принцип конструкцій у таких випадках:

- для приладів, в яких відсутні частинні (додаткові) функції, тому розбиття на окремі функціональні рівні недоцільне або ж неможливе;

- потреба у високих технічних та експлуатаційних параметрах – герметизація, температурна стабілізація, віброзахист тощо;
- потреба в компактності;
- розрахунок на тривалий час експлуатації.

Окремо акцентуємо групи приладів, побудованих за **моноблочним принципом**:

- прилади з мінімальними внутрішніми та зовнішніми розмірами, які принципово неможливо ділити на блоки; наприклад, стимулятори серця або інших органів, медичні та інші зонди, прилади космічних та ракетних систем;
- прилади, що виробляються в невеликих кількостях, для яких розбивка на окремі блоки невиправдана (спеціальні вимірювальні системи з обмеженим застосуванням).

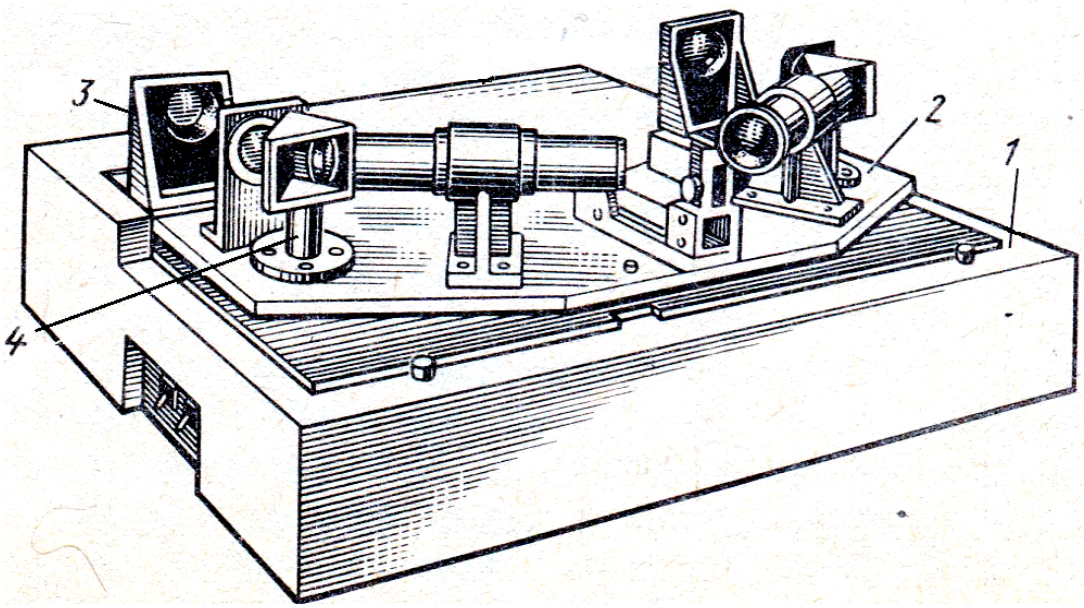


Рис. 8.13. Моноблочна конструкція з базовим елементом, тип А; внутрішня геометрична структура спектрофотометра СФ-18 [24]:

1 – монолітна чавунна станина; 2 – монтажна плита;
3 – кронштейни; 4 – стійка

Опис оптичної схеми МИИ-4 (рис. 8.14)

Нитка лампи *1* конденсором *2* з міжлінзовим інтерференційним світлофільтром проєктується в площину апертурної діафрагми *3*. Об'єктив *5* з допомогою напівпрозорої плоскопаралельної пластини *8* переносить зображення діафрагми *3* в площину вхідних зіниць двох однакових мікрооб'єктивів *7* і *10*, а зображення польової діафрагми *4* – у безмежність. Мікрооб'єктиви *7* і *10* формують дійсне зображення польової діафрагми відповідно на поверхні об'єкта дослідження *6* та на поверхні плоского еталонного дзеркала *11*. Компенсаційна пластина *9* вирівнює довжину ходу пучка, що відбився від еталонного дзеркала, з ходом того, що відбивається від

поверхні досліджування. Отже, ці два пучки, зустрівшись на другій поверхні пластини *8*, інтерферують. Зображення картини переноситься об'єктивом *13* в площину сіток гвинтового окулярного мікрометра МОВ-1-15$^{\times}$. Дзеркало *14* можна вивести з ходу променів, і тоді картину можна спостерігати на матованій поверхні екрану 16; при потребі передбачена установка фотоапарата.

Характеристика конструкції

Моноблочна конструкція з базовим елементом; тип Б; модульне виготовлення та складання; послідовно-паралельна схема перетворення сигналу: поєднання інтерферометра Майкельсона та мікроскопа.

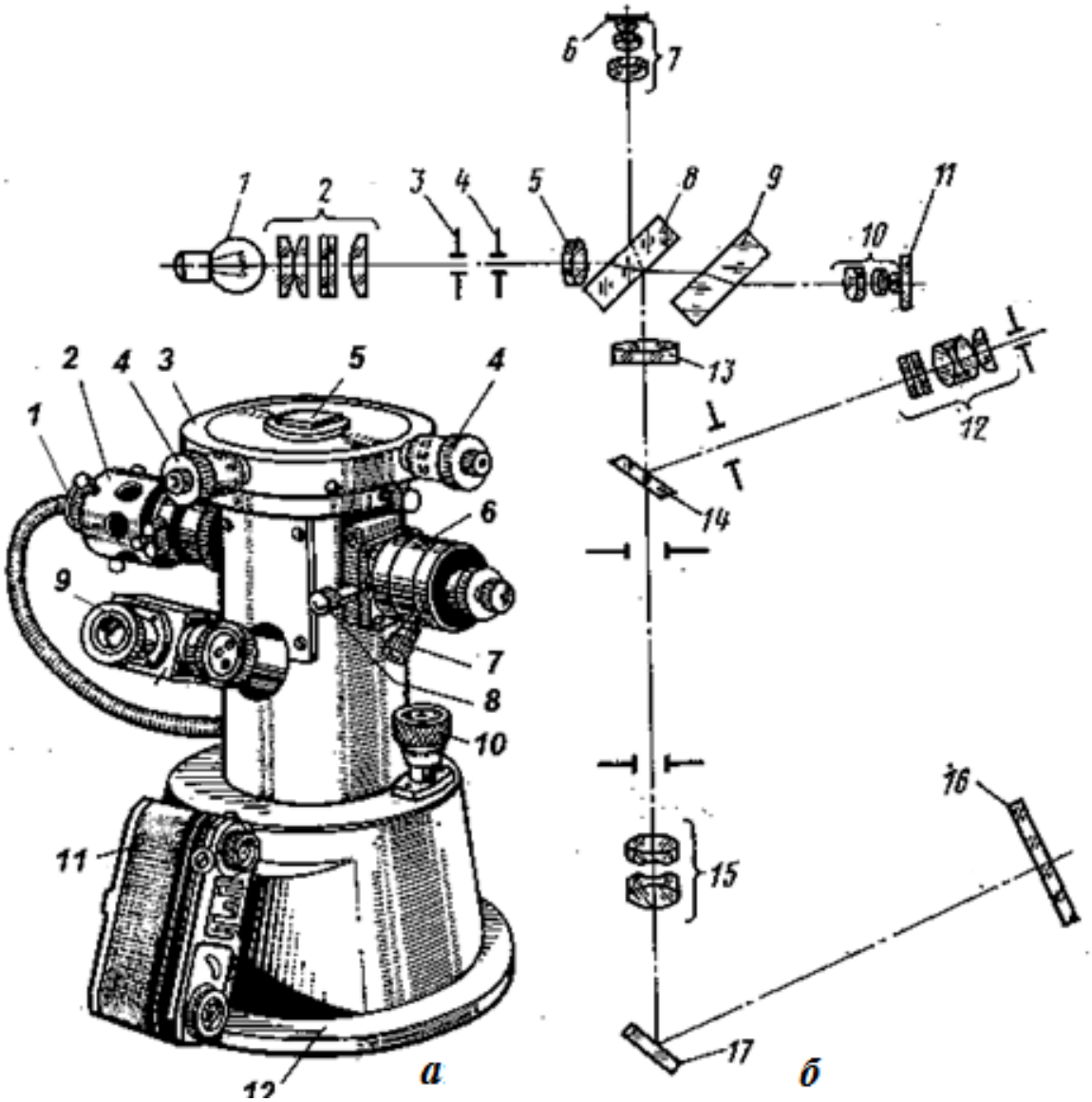


Рис. 8.14. Зовнішній вигляд та оптична схема мікроінтерферометра МИИ-4:
***а* – зовнішній вигляд; *б* – оптична схема**
а – зовнішній вигляд: *1, 2* – освітлення; *3* – об'єктний столик; *4* – поперечне переміщення об'єкта; *5* – об'єкт дослідження; *6, 7, 8* – налаштування інтерферометра; *9* – окуляр МОВ 1-15$^{\times}$; *10* – рукоятка фокусування; *11* – фотоапарат (екран); *12* – база корпусу

Переваги застосування моноблочних систем:

- невеликі затрати на конструювання, оскільки розробка та доробка здійснюються в ході виготовлення дослідного зразка;
- можливість забезпечення високих технічних та експлуатаційних параметрів (герметизація, температурна стабілізація, віброзахист тощо).
- компактність конструкцій.

Недоліки:

- потреба у спеціалізованому обладнанні при виготовленні, а також у спеціалізованих пристосуваннях при складанні та засобах контролю;
- низький ступінь автоматизації при виготовленні;
- низький ступінь уніфікації деталей та вузлів;
- великі затрати на виготовлення, складання, налаштування та юстування, ускладнений контроль за параметрами;
- взаємний вплив окремих модулів;
- вузькоспеціалізовані функції приладу.

У моноблочних виробах ієрархія розбудови – це строга послідовність операцій складання. Демонструється структурною схемою рис. 8.2 – складання з базовим елементом (як зазначалось). Основу виробу складає монолітна база – це станина або рама. Станина – деталь, відлита з металу (чавун, силумін), об'ємна геометрична форма якої оснащена відповідно обробленими базовими елементами (поверхнями), до яких кріпляться складові частини конструкції, тобто проводиться складання виробу (монтаж елементної бази). Рама – це спрощений варіант базового елемента, зварена (електро- або газозварка) зі стандартних литих профілів (одно- , двотаврова балка, кутники), як це демонструється на рис. 8.21, рис. 8.22.

У моноблочному виробі система орієнтації окремих деталей та складальних одиниць строго визначена конструкцією приладу. Послідовність складання в технічній документації записується у вигляді цифр, знаків, які присвоюються складальним одиницям (шифр одиниці). В конструкторській практиці побутує використання ***цифрових маркерів*** – цифровий шифр деталі, складальної одиниці (див. рис.8.9, *а*), занесених у специфікацію на виріб.

8.3.3. Базові елементи

Вищерозглянутим способом складання переважна більшість деталей та складальних одиниць приєднується одна до одної та до корпусу або взаємно орієнтуються відповідно до функціональної ідеї технічної системи за допомогою *базових елементів,* спрощено – *бази.* Це реальні поверхні або їх поєднання. Базами можуть виступати й віртуальні елементи – деяка точка, площина (симетрії), вісь обертання, які належать деталі або складальній одиниці.

Бази поділяють на: *1) конструкторські*, 2) *технологічні*, *3) вимірювальні* [67].

Конструкторською *базою* називають ті елементи або їх поєднання, які визначають положення певної деталі або складальній одиниці у виробі. К. бази поділяють на основні та допоміжні. Якщо конструкторська база, що належить даній деталі чи складальній одиниці, визначає їх власне положення у виробі, то така база називається основною. Якщо ж К. база визначає положення у виробі інших приєднуваних деталей або складальних одиниць, то така база називається допоміжною.

Пояснення основних та допоміжних баз проведено на прикладі вузла монтажу зубчатого колеса *1* на валу *2*, який вільно обертається в стояках *3, 4*, закріплених на основі *5* (рис.8.15). Монтажні поверхні стояків *3, 4* є основними, позаяк вони визначають власне положення у цій конструкції. Навпаки, поверхні основи 5 визначають положення не самої основи, а стояків *3, 4*, тобто ці поверхні є допоміжними базами. Далі, внутрішні циліндричні поверхні отворів у стояках є допоміжними поверхнями, бо визначають положення валу, а посадкові поверхні цапф валу 2 – основними. Поверхні середньої частини валу, на яку лягає зубчасте колесо, є допоміжною базою, а спряжена з нею внутрішня циліндрична поверхня ступні зубчастого колеса – основною; остання орієнтує положення колеса у конструкції.

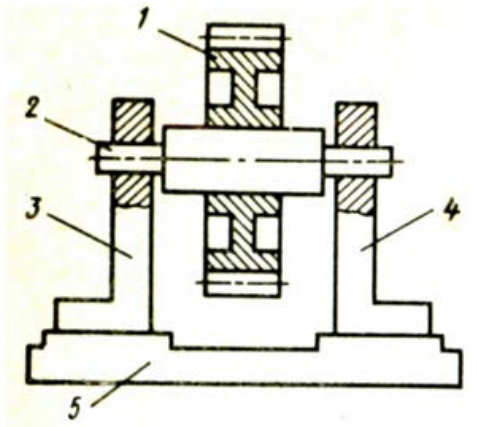


Рис. 8.15. Конструкторські бази:
1 – зубчасте колесо;
2 – вал;
3, 4 – стояки;
5 – основа

Технологічною *базою* називається база, яка використовується для визначення положення заготовки або виробу в процесі їх виготовлення або ремонту. Технологічна база, при заданні спеціальних розмірів, використовується для встановлення положення інструменту обробки відносно деталі.

Вимірювальною *базою* називають базу, яка використовується для визначення відносного положення заготовки або виробу та засобів вимірювання.

Задача конструктора – виявлення потреби в базах з акцентом в кресленнях, їх вказівка у виразній споглядальні формі, що забезпечить надійний контроль при складанні та експлуатації виробу та високі технічні параметри виробу.

Базова оптимальність – це, по-перше, мінімальна кількість баз, по-друге – конструктивне і технологічне зведення всіх трьох названих баз до однієї.

При потребі для забезпечення належної орієнтації окремі базові елементи маркують, як і складальні одиниці, відповідними символами-маркерами.

Конструктивні елементи, призначені для регулювання взаємної орієнтації окремих деталей, вузлів або ж виробу в цілому відповідно до функціонального призначення, носять назву систем позиціювання.

8.4. Уніфіковані комплекси із центральним функціональним модулем

Уніфіковані збірні комплекси – створення вимірювальних або інших комплексів на основі деякого спеціального функціонального модуля, розробленого для виконання конкретної науково-технічної задачі. До складу комплексу входить вищезазначений модуль і стандартні прилади широкого призначення. Все це об'єднане в одне ціле за допомогою стандартної комунікативної елементної бази. Внаслідок використання серійних приладів та пристосувань значно зменшуються витрати на розробку та скорочується термін усієї розробки. Отже, наявний економічний ефект та прискорення науково-технічного прогресу. Отримуються також високоякісні показники, адже серійні прилади пройшли випробування часом, їм властиві високі техніко-експлуатаційними показники.

Графічне зображення таких систем показане на лицевому рисунку.

8.5. Компонування елементної бази (Б.Е.)

[63–67]

Компонування – процес пошуку, розробки та реалізації раціонального розміщення елементів конструкції у обмеженому корпусом виробу просторі відповідно до його функціональної структури.

Процесу компонування передує розробка функціональної схеми конструкції, яка буде визначатись видом фізичних положень, закладених у функціональну структуру виробу. Ця задача особливо ускладнена при комбінованих принципах фізичних положень; конкретизація розв'язку функції перетворення сигналу в таких випадках неминуче призводить до неоднозначності, варіанти яких потребуватимуть оптимізації рішень.

8.5.1. Загальні правила

При конструюванні виробу, незалежно від принципу складання та типу конструкції, необхідно дотримуватися наведених нижче загальних правил.

1. Конструкція має бути поділена на складальні одиниці за функціональними ознаками.
2. Кількість деталей, що входять до складальної одиниці, по можливості, має бути мінімальною.

3. Складальні одиниці мають бути взаємозамінними, технологічно завершеними і не потребувати додаткових доробок або підгонок на місці установки.
4. Конструкція має забезпечувати можливість незалежного складання деталей, вузлів, модулів.
5. *У обґрунтованих* випадках допускається послідовність складання відповідно до послідовності функціональної структури (порушення вимог попереднього правила).
6. Необхідно передбачити *автономну* заміну окремих складальних одиниць.
7. При монтажі у спільному кожусі окремі блоки не повинні справляти негативний взаємний вплив (теплове чи електромагнітне випромінювання, вібрації та ін.);
8. При компоновці необхідно враховувати вимоги до герметичності, екранування, а також вимоги умов експлуатації та установки приладу.
9. Передумовою компоновки оптико-електронних приладів є розробка оптико-кінематичної схеми.
10. Характерною ознакою раціональної компоновки є компактність конструкції при її функціональній спроможності.

8.5.2. Проблеми компоновки

При компоновці виникають проблеми, які зводяться до такого.

1. *Забезпечення функціональних властивостей*:
   - *механіка:* проблема безперешкодного взаємного переміщення окремих суміжних рухомих ланок за робочий цикл;
   - *електроніка:* розмежування частин, які виявляють взаємний негативний вплив, таких як електромагнітне наведення струмів у електричних колах, зворотні зв'язки, інше;
   - *оптика:* 1) наявна механічна елементна база, особливо ланки, що переміщуються, не має перешкоджати проходженню променів оптичної системи; 2) поява аберацій у оптичних елементах унаслідок зовнішніх механічних, теплових та інших діях на ці елементи.

2. Мінімізації габаритів, яка забезпечується:
   - глибиною пошукових, проєктних дій та конструкторської проробки задачі з наступним макетуванням і комп'ютерним моделюванням;
   - використання спеціальних форм деталей, уведенням ребр жорсткості в конструктивні елементи;
   - використання системного підходу при компонуванні, що полягає у використанні методів перебору варіантів, інверсії та суміщення функцій [6, 69].

Ефектна демонстрація процедур впорядкування рішень зображена рис. 8.16 [50].

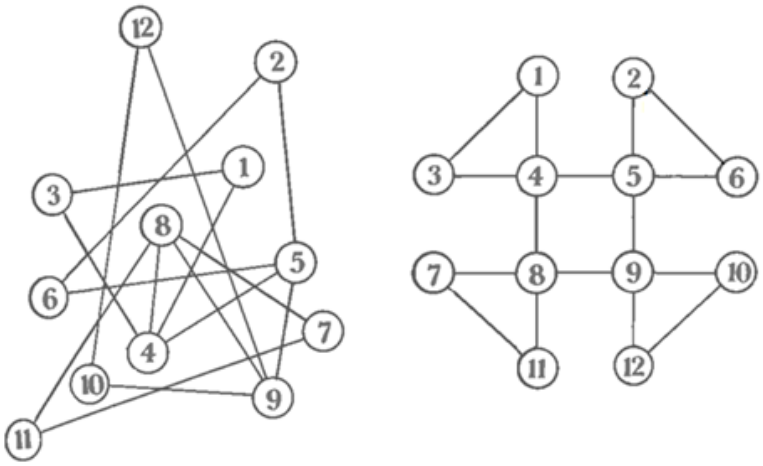


Рис. 8.16. Приклад впорядкування рішень

8.5.3. Процес компоновки

Процес компонування настає, як зазначалося, після здійснення головного у проєкті – *розробки функціональної схеми.*

Здійснюється в 2 етапи:

1) ескізне проєктування, при якому розробляється конструкція в загальному вигляді при можливих варіантах;
2) робочий проєкт – поглиблена розробка конкретного вибору (розв'язку) компоновки, отриманого на першому етапі.

Для механічних (оптико-механічних) систем началом розробок є розробка кінематичної (оптико-кінематичної) схеми та схеми оптимальної течії силових потоків. Далі необхідно визначитися з комплектацією елементної бази. Перевага надається стандартним виробам; розробка нових категорично не бажана; при необхідності має бути обґрунтована технічними та економічними чинниками.

Раціональна форма деталей та їх розміри – такі, які відповідають найбільш доцільному взаємному розташуванню.

Зауважимо, що на відміну від філософських підходів до аналізу та синтезу в окремих постулатах, в яких слідують від частинного до цілого, від простого до складного, – у конструюванні при *компонуванні* виробів необхідно діяти навпаки: від *загального* до *окремого*.

Уточнення деталей конструкції не корисне, а й шкідливе, відволікає увагу конструктора від розв'язання основних задач компонування і може порушити логіку функціональної схеми, яка лягає в основу процесу конструювання [68].

8.5.4. Методи компоновки

8.5.4.1. Метод перебору

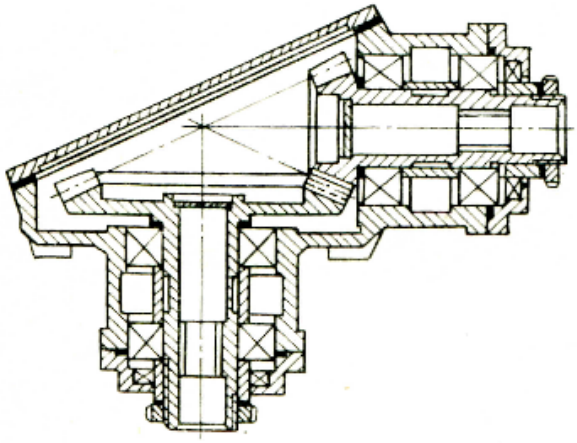
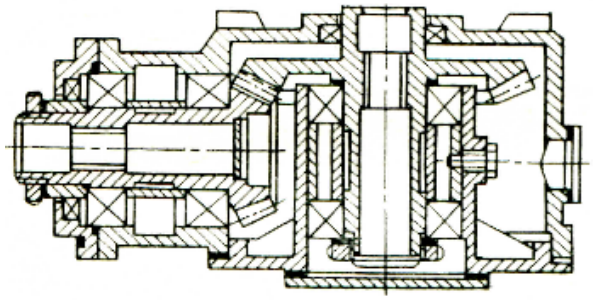
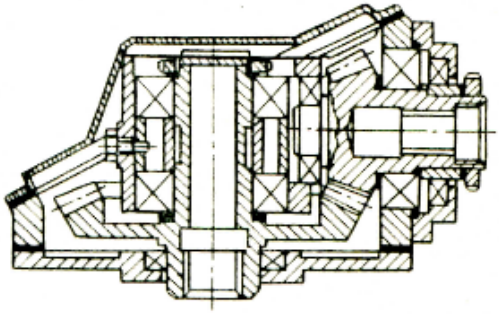
Перебір варіантів компоновки; полягає у зміні положень та розташування конструктивних елементів виробу. Оцінка результатів перебору, як правило, суб'єктивна і залежить від кваліфікації конструктора.

Метод перебору варіантів демонструється на прикладі оптимізації конструкції конічної зубчастої передачі (табл.8.1) [68].

З наведених у таблиці рисунків бачимо, що передача стає більш компактною. Але, разом з цим, втрачаються експлуатаційні властивості. Разом з дієвістю методу перебору варіантів, з причини тривалості процесу, на практиці пошук поліпшеного варіанта в більшості випадків припиняють на півдорозі. Складність застосування методу перебору полягає у відсутності якісних показників оцінки варіантів, унаслідок чого така оцінка може бути недостатньо об'єктивною. Для таких випадків рекомендовано так звану матрицю оптимізації вибору, використання якої істотно підвищує об'єктивність.

Таблиця 8.1

Оптимізація конструкції кутової передачі методом перебору варіантів

Ескіз	Характеристика
	Найбільш поширена конструкція. Суцільний корпус при виготовленні спрощує забезпечення точного взаємного пертину осей. Доступність огляду коліс забезпечується наявністю оглядового люка з кришкою. За умови складання діаметр шестерні (малого колеса) має бути меншим зовнішнього діаметру підшипника цього ж валу. Шпарина в зачепленні регулюється мірною шайбою, яку встановлюють на вал зубчастого колеса, що є недоліком, так як для підбору необхідне повне розбирання конструкції.
	Вал колеса встановлений на двох підшипниках в кришці корпусу. Огляд механізму в зібраному вигляді практично неможливий, тому регулювання зачеплення можливе наосліп лише за фарбою. Для зняття кришки з колесом необхідний попередній демонтаж шестерні, після чого механізм стає розрізненим.
	Варіант зі зниженою висотою корпусу і штампованою кришкою великого розміру, яка забезпечує зручний огляд механізму.

Так, у [6] наводиться приклад побудови матриці оптимізації вибору матеріалу оправи лінз (табл.8.2), закріплених методом вальцювання.

Таблиця 8.2

Матриця оптимізації вибору матеріалу оправи круглих оптичних деталей, закріплених вальцюванням

Властивості матеріалів	**Вагові коефіцієнти**	**Варіант металу: Показники якості**		
		Сталь	**Латунь**	**Алюмінієвий сплав**
Міцність	0,2	10 2,0	5 1,0	1 0,2
Пружність	0,1	10 1,0	5 0,5	1 0,1
Пластичність	0,5	2 1,0	8 4,0	10 5,0
Технологічність	0,1	3 0,3	10 1,0	8 0,8
Вартість	0,1	8 0,8	3 0,3	6 0,6
Підсумок	1,0	5,1	6,8	6,7

На матеріал оправи накладається низка вимог до механічних властивостей, технологічність та вартість, які наведені у лівому стовпці таблиці. Їх роль і значення оцінюється ваговими коефіцієнтами (другий стовпець), сума яких має дорівнювати одиниці. Далі йдуть стовпці з параметрами якості конкуруючих матеріалів, приписуються бали від 1 до10 для кожного з показників; їх записують у верхньому лівому кутку графи, що знаходиться на перетині стовпця матеріалу і рядка показника. Далі бали помножують на ваговий коефіцієнт, а їх добуток записують у нижньому правому кутку тієї ж клітини; отримані результати підсумовують по стовпцях і записують у підсумок. Ці суми являють собою інтегральним показником якості для кожного матеріалу. В даному прикладі найбільший коефіцієнт отримано для латуні, хоча показник для алюмінієвого сплаву дуже мало відрізняється від нього. Отже, ці матеріали практично рівноцінні; на практиці перевага віддається алюмінієвому сплаву, як дешевшому та більш легкому. Але, при якісних пріоритетах, обирають латунь, як більш благородний метал. Вміст вуглецю у сталі

не має перевищувати 0,3%; латунь – свинцева (ЛС59-1), алюмінієвий сплав з групи дюралей (Д16). Значення балів показників якості, як і ваговий коефіцієнт, встановлюють методом експертних оцінок. Ці дії проводяться групою спеціалісті (конструктори, технологи, нормувальники).

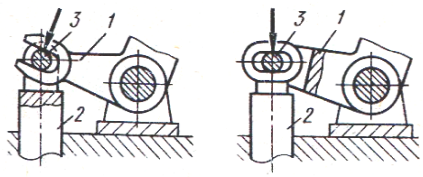
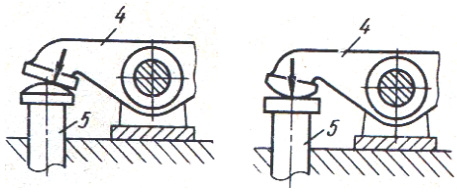
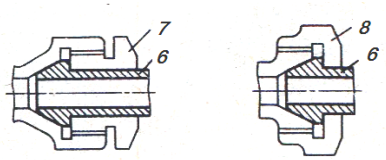
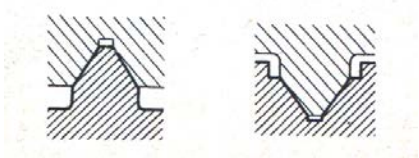
8.5.4.2. Метод інверсії

Серед прийомів, що підвищують ефективність роботу конструктора, значне місце посідає метод інверсії – обернення (обмін ролями) функціями окремих деталей, зміна їх форм та розташування без зміни функціональної схеми. Сюди додаймо зміну функціональних ролей кінематичних ланок, інверсії форм кінематичних пар. У вузлах інколи буває вигідним поміняти деталі ролями – ведучу ланку зробити веденою, напрямну – такою, що переміщується.

В табл. 8.3 демонструються варіанти інверсії типових вузлів [68].

Таблиця 8.3

Схеми інверсії типових вузлів

Схеми		Порівняльна характеристика схем
I	II	
Привід тяги 		В схемі I важіль *1* вилкою приводить в дію тягу 2 через вісь *3*, встановлену в наконечнику тяги. В схемі II вісь *3* встановлена в наконечнику важеля, а наконечник тяги виготовлений у вигляді провушини. Результат інверсії – ліквідація поперечних сил на тягу. У схемі II ускладнене виготовлення провушини тяги
Привід штовхача 		В схемі I ударник коромисла *4* плаский, тарілка штовхача *5* – сферична; в схемі II – навпаки. Інверсія усуває поперечні навантаження на штовхач. Поверхню ударника можна виготовити циліндричною, що забезпечить лінійний контакт поверхонь взаємодії
Ніпельне сполучення 		В схемі I ніпель *6* затягується внутрішньою гайкою *7*, а схемі II – зовнішньою *8*. Осьові габарити в схемі I дещо більші, в радіальні – менші. В схемі II – навпаки
Напрямні 		Схема I більш вигідна за умов меншого забруднення, а схема II – за умов змащування

Задача конструктора – побачити можливий варіант зміни, оцінити переваги та недоліки вихідного та інвертованого варіантів і здійснити вибір.

8.5.4.3. Метод суміщення функцій

При дослідженнях та аналізі технічних систем виявилось, що окремі групи елементів (деталей) у складальній одиниці, або ж окрема деталь, або ж один і той самий елемент поверхні деталі, може виконувати декілька функцій. Такий стан отримав назву методу суміщення функцій.

Розрізняємо рівні суміщень:

1) схемотехнічні; 2) деталізація; 3) елементаризація.

Схемотехнічні. Найбільш яскравий приклад суміщення функцій спостерігаємо у мікромеханізмі системи Мейєра (рис. 8.17) [6, 66], розробленому для одночасного суміщення функції переміщення системи фокусування мікроскопа та глибинних вимірювань.

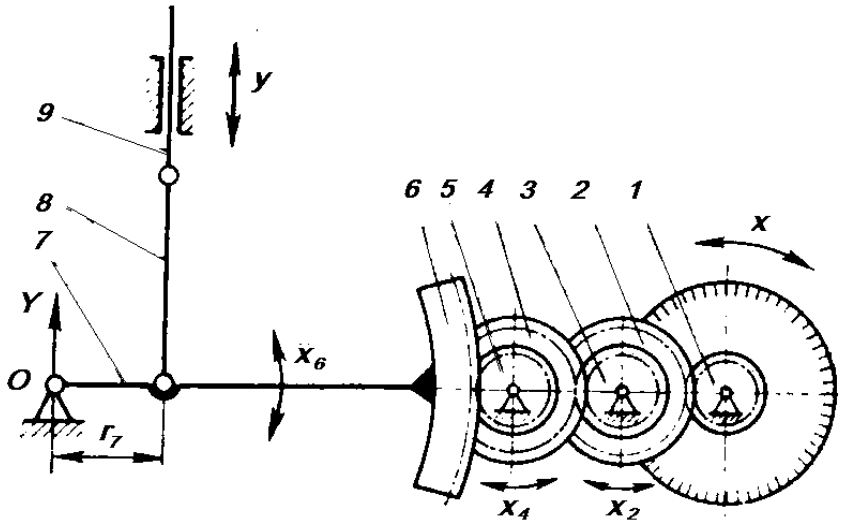


Рис. 8.17. Функціональна схема мікромеханізму системи Мейєра

Обертання відлікового барабанчика, нероз'ємне сполученого із зубчатим колесом 1, через систему зубчатих коліс 2-3, 4-5, приводить в обертовий рух зубчастий сектор 6, який являє собою одне з плечей (довжиною r_6) важільно-шарнірного механізму. Друге плече (довжиною r_7), ланка 7, одночасно входить у склад кривошипно-повзункового механізму, виконує у ньому функцію кривошипа. Ланки 8, 9 – відповідно шатун та повзун; останній, як виконавча ланка, передає поступальний рух в деяких мікроскопах об'єктиву мікроскопа, а в інших – тубусу або ж предметному столику.

Тут бачимо один і той же кінематичний ланцюг, що виконує як функцію керування чутливим елементом вимірювального приладу, так і зчитування результатів вимірювання за круговою шкалою. Крім цього, зубчастий сектор

одночасно виконує як функцію передачі обертання, так і функцію важеля для переміщення виконавчої ланки.

Деталізація. На рис. 8.18, у диференційному механізмі, одна й та сама деталь, гвинт 1, виконує як функції гвинта, так і гайки. Внаслідок виявлення таких можливостей досягається поглиблення компактності конструкції.

Ведучою ланкою в даному механізмі є рифлена рукоятка обертання *1* із зовнішньою різьбою з кроком t_1 та внутрішньою – крок t_2. Обертання цієї рукоятки на величину *X* вправо приведе до лінійного переміщення вліво ланки *1* в корпусі *2* вздовж осі на величину Y_1. Але внаслідок обертання, внутрішня нарізка *1* з кроком t_2 , що взаємодіє з аналогічною зовнішньою нарізкою осердя *3*, поведе його в лінійний рух вправо. Для того, щоб лінійний рух здійснився, необхідно утримувати деталь *3* від обертання, що здійснюється за допомогою установки штифта *4* у прорізі *5*, виконаному в корпусі *2*.

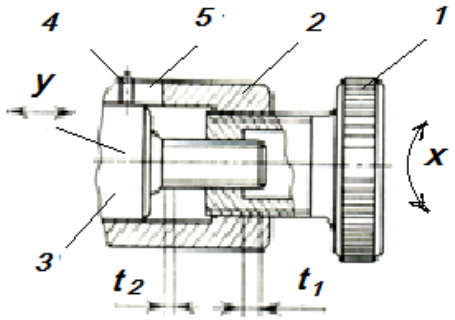


Рис. 8.18. Диференційний гвинт

Елементаризація. В конструкції кріплення лінзи *1* в оправі *2* здійснено методом вальцювання (рис.8.19). Вальцювальний комірець *3* як елемент поверхні оправи виконує дві функції – кріплення круглої деталі та пружного елемента (термокомпенсація, вібраційний захист), завдяки чому отримується надзвичайно проста та компактна конструкція.



Рис. 8.19. Приклад суміщення функцій структурними елементами конструкцій: кріплення оптичного блока в оправі вальцюванням

1 – оптичний блок;
2 – оправа;
3 – вальцювальний комірець

8.6. Компоновка оптико-механічних систем

Розгляд конструктивних рішень різних оптичних приладів дає можливість виділити такі основні способи компонування приладів взагалі та окремих блоків зокрема: 1) в єдиному корпусі, на монтажній литій станині; 2) застосування труби як монтажного елемента; 3) етажерковий принцип; використання монтажних плат із колонами; 4) застосування стандартних профілів як несучих елементів; модульний принцип. Розглянемо їх [24].

1-й спосіб: в єдиному корпусі та монтажній литій станині (зображений рис. 8.13, 8.14).

2-й спосіб: застосування труби як монтажного елемента; демонструється рис. 8.20.

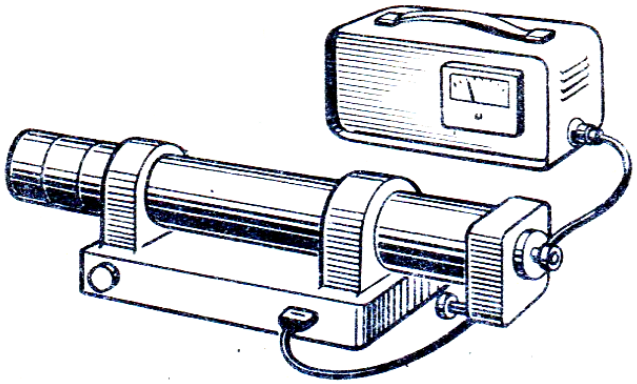


Рис. 8.20. Компоновка лазерного автоколіматора застосуванням труби як несучого елемента

Позитивною ознакою цього способу є висока жорсткість і стабільність конструкції. Сюди додаймо технологічність та конструктивність; цей варіант використовується при створенні контрольно-юстувальної апаратури, високоточних кутомірних систем, апаратури наукових досліджень дзеркального та дифузного відбивання, інтерференційних та поляризаційних ефектів.

3-й спосіб – етажерковий принцип на монтажних платах із колонами. Забезпечує просторовий спосіб монтажу, ємність та одночасно компактність конструкції. Як бачимо з рис.8.21, контрукція будується на трьох монтажних плато *1*, сполучених між собою колонками *2*. На двох верхніх плато, на стояках та кронштейнах, закріплені оптичні елементи, на нижній – електроніка. Такий принцип побудови використовується в тому разі, якщо потреба в приладах незначна, прилади володіють вузькоспеціалізованими функціями, перспективи подальшого використання відсутні.

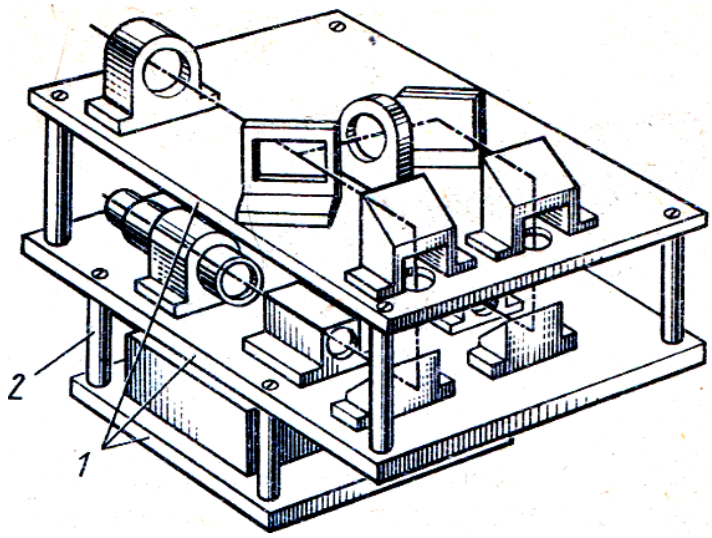


Рис. 8.21. Етажерковий принцип на монтажних плато з колонами:
1 – плато; *2* – колони

4-й спосіб – застосування звареної рами з стандартних профілів як несучих елементів (рис. 8.22). Використовується на етапах макетування та виготовлення дослідних зразків для перевірки на функціональність та у випадках громіздких систем.

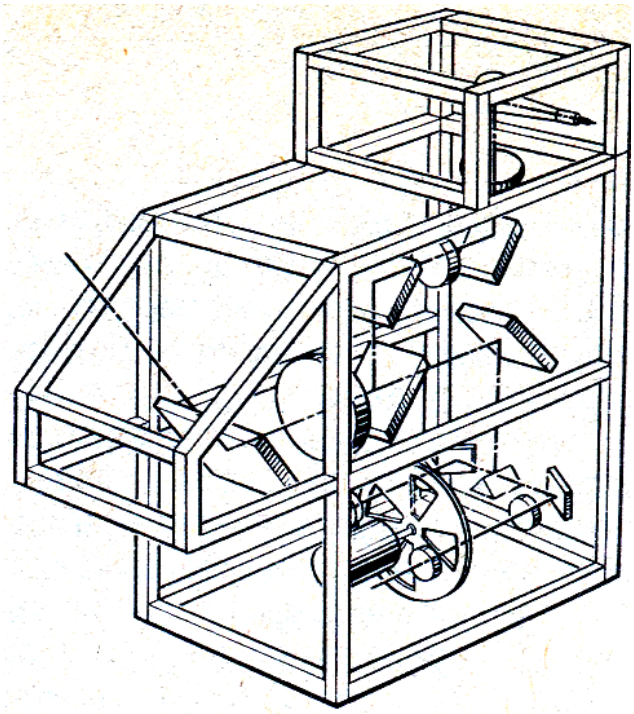


Рис. 8.22. Компоновка з використанням зварної рами з профільного прокату [24]

Перевагою такої конструкції є простота виготовлення несучої рами та монтажу вузлів, їх доступність при юстуванні та налаштуванні. Можливий недолік – недостатня жорсткість; для підвищення вібраційної стабільності в кутові пройми несучих вварюють металеві косинки. Цей недолік особливо значний при зовнішніх температурних змінах.

8.7. Установка елементної бази

Найкраща конструкція така, в якій забезпечений принцип байдужості установки окремої деталі чи вузла

Включає:

1) взаємне розміщення всієї елементної бази конструкції;
2) забезпечення виконання операцій позиціювання;
3) укладка, підвіска, підтримка, зміщення, насадка, нагвинчування.

В довільній конструкції положення елементної бази мусить бути однозначно встановлене: недопустимі конструкції, при яких складальник здійснює монтаж на власний розсуд. Небажані конструкції, які потребують регулювання, підгонки по місцю. Обмежуватися напівмірами, такими як установка міток або рисок взаємної орієнтації спряжених елементів, клейма, не бажано.

Єдиний правильний підхід – розробка конструктивних заходів на стадії конструювання виробу, які забезпечують розміщення та складання деталей і вузлів лише в строго визначеній взаємній орієнтації та послідовності в просторі локалізації системи: розробляється *карта технологічного процесу складання*.

Однозначність монтажу забезпечується проєктуванням *базових складальних елементів* (складальні бази – елементи поверхонь деталі), які усувають неоднозначність монтажу складальних одиниць.

В ***механіці*** до базових складальних елементів відносять:

1) установку контрольних штирів з асиметричним розміщенням;
2) виготовлення лисок, установочних шпонкових канавок;
3) встановлення фіксаторів болтів від провертання та осьового переміщення;
4) встановлення шпильок з номінальними діаметрами або кроком різьб, що відрізняються.

Графічні приклади однозначності установки механічних деталей у складальній одиниці наведені на рис. 8.23 [69]. У вузлу кріплення кришки 8підшипника (верхній зліва) положення кришки фіксується відносно корпуса двома контрольними штифтами *1*. Помилка схеми *а)* полягає в симетричності розташування штифтів; при складанні не виключено, що кришку розвернуть на 180° відносно вихідного положення, в результаті чого буде порушена циліндричність ложа підшипника і площина торців, що було досягнуто попередньою механічною обробкою в зібраному стані. Асиметричне розташування штифтів (рис.8.23, *б, в*) виключає можливість неправильного складання.

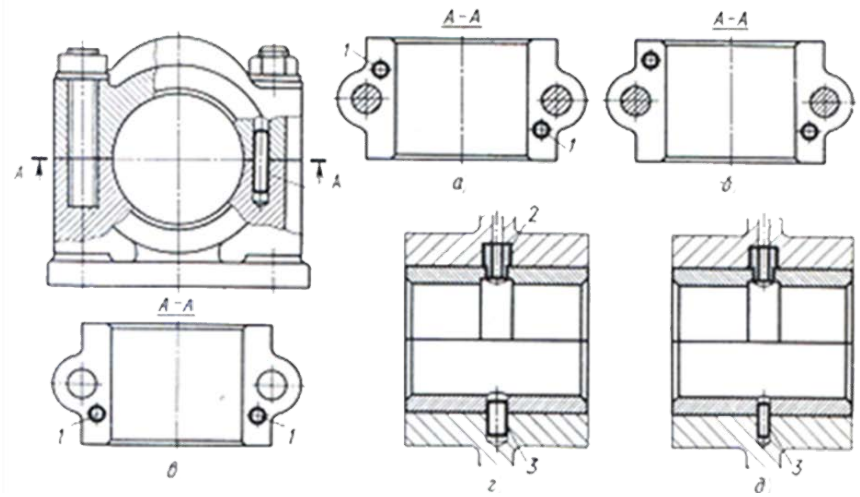


Рис. 8.23. Конструктивні заходи попередження неправильного збирання

В підшипнику ковзання (рис.8.23, *г*) вкладиші установлені в роз'ємному корпусі: верхній має отвір на мастило провідному штуцері *2*, а нижній – на контрольному штифті *3* того ж діаметра. При складанні можна помилитися, встановивши нижній вкладиш на верх, а верхній – на низ. Можливість помилки усувається, якщо штуцер і штифт виконати різними діаметрами (Рис.8.22, *д*).

В ***електриці, електроніці***: 1) розробка індивідуальних посадочних місць під кожну із плат або індивідуальних за діаметром та типом роз'ємів стикування; 2) встановлення клеймованих бандажів на кожний кабель; 3) використання відмінних за діаметром клем.

Додатки

З історії становлення та розвитку техніки [71]

Тихо народжене звучно крокує,
Падає, зводиться, знову прямує,
Велич людини підносить.

1. Етапи становлення інженерної справи

Термін «інженер» (фр. ingenieur від лат. ingenium – розум, винахідливість, вроджені здібності) з'явився і набув великого поширення у Європі в XIII – XIV ст. У XVII ст. через французьку та німецьку мови це слово проникло і до Росії. Історія інженерної діяльності тісно пов'язана з історією цивілізації та закономірностями розвитку техніки, досягнення яких значною мірою були забезпечені працею та творчістю цієї категорії технічних працівників.

Перший етап, так званий праінженерний, – епоха рабовласництва. Пов'язується голово з будівництвом та архітектурою. Він ознаменував собою різкий стрибок у розвитку суспільних форм технічної діяльності, перший вузловий момент її історії. Найбільш визначними інженерами цієї епохи були вихідці знаменитої Александрійської школи: Герон Александрійський, Ктесібій, Архімед, а також римський архітектор Марк Вітрувій Полліон, який написав працю «Десять книг про архітектуру».

Другий (передінженерний) етап інженерної діяльності розпочався в епоху Відродження та розвивався в умовах феодалізму та зародження машинного виробництва. Основною сферою інженерної діяльності продовжує залишатися будівництво, а також створення військової техніки (металевих, стінобійних та ін. машин). І тому в «Енциклопедії» Дідро та Д'Аламбера інженер визначається як будівельник військових укріплень та машин. Найвидатнішим інженером епохи Відродження був Леонардо да Вінчі, – художник, архітектор, механік, експериментатор та винахідник, геніальність якого підкріплена широкими технічними знаннями.

Третій етап становлення інженерної діяльності мав місце в епоху промислового перевороту та поширення робочих машин на базі парового двигуна.

Четвертий етап представляв розвиток інженерної діяльності на основі системи машин та технічних наук в умовах монополістичного капіталізму. У Х1Х в. розвиток науки, викликаний потребами матеріально-технічного виробництва, привів до виникнення соціальних інститутів технічних наук та науково обґрунтованої технічної діяльності, яка почала вважатися інженерною.

Відтоді технічна підготовка виробництва стає переважно інженерною, перш за все, конструкторською та технологічною, а *інженер* – це вже здебільшого *машинобудівник*.

П'ятий етап – формування сучасного інженера за доби науково-технічної революції. У другій половині XX ст. відбувається якісний стрибок у розвитку соціальної функції науки як безпосередньої продуктивної сили. Носіями цієї функції стають інженери, діяльність яких і є основним каналом перетворення науки на безпосередню продуктивну силу.

За сучасним визначенням, інженер – це фахівець з вищою технічною освітою у якій-небудь галузі техніки. Інженерні розробки поглинають основну частку витрат під час створення нової техніки, а кількість інженерів, як правило, значно перевищує кількість науковців і продовжує зростати в тій самій пропорції. При виробництві нових унікальних технічних об'єктів трудовитрати інженерів рівні трудовитратам робітників, а інколи й перевищують їх.

Сучасна інженерна діяльність є найбільш зрілою формою трудової діяльності, безпосередньо спрямована на виконання технічних завдань та створення техніки. Техніка – єдиние, що об'єднує всіх інженерів, незалежно від того, в якій сфері суспільного життя використовується їхня праця.

Інженерну діяльність не можна ототожнювати з науковою, зокрема у галузі технічних наук. Якщо вчений переслідує пізнавальну мету, то перед інженером завжди стоїть конкретне практичне завдання – створити технічний або технологічний об'єкт, причому впродовж обмеженого проміжку часу і з мінімальними витратами. Інженерна діяльність володіє сенсом лише тоді, коли її результати мають практичну реалізацію, а інженер відповідає за технічні рішення протягом усього терміну експлуатації технічного об'єкта, аж до його заміни більш прогресивним.

Інженерна діяльність – це технічне застосування науки, спрямоване на виробництво техніки і задоволення суспільних технічних потреб. Однак наявність принципових відмінностей наукової й інженерної діяльності зовсім не означає, що їх не можна поєднувати. Творчість видатних діячів науки та техніки, таких як Архімед, Леонардо да Вінчі, Леонардо Ейлер, Дмитро Менделєєв, Кірхгоф, Томас Едісон, Клод Шенон та ін., переконливо доводять необхідність та можливість зміни предмета праці, переходу від наукової до інженерної діяльності і навпаки.

Засобами інженерної праці є наукові знання, результати наукової діяльності виявляються у вигляді готових методик розрахунків, формул, залежностей, правил, нормативів та інших засобів підготовки виробництва. Результати інженерної діяльності, своєю чергою, є засобами праці

робітників, які опосередковують вплив інженера на техніку. Інженер виступає в ролі основного джерела технічного прогресу, доказ чого – постійне збільшення частки витрат інженерної праці в загальних витратах при створенні сучасних технічних об'єктів. Отже, інженерна справа є розвиненою формою технічної діяльності, набула відносної самостійності та стала соціальним інститутом у результаті поділу праці та розвитку продуктивних сил і виробничих відносин.

2. Віхи розвитку техніки

1. Первісна техніка (до IV тис. до н.е.).
2. Антична техніка (IV тис. до н.е. – V ст. н. е.).
3. Середньовічна техніка (V – XVI ст.).
4. Техніка епохи мануфактурного виробництва (XVII ст. – 1760 р.).
5. Техніка епохи промислового перевороту (1760 – 1870 рр.).
6. XX століття, починаючи з 1919 року.

2.1. Первісна техніка (до IV тис. до н.е.)

1. 800 – 400 тис. до н. е. (дошельська культура); зарождення техніки обробки каменю і застосування еолітів.
2. 400 – 100 тис. до н. е. (шельська культура) – виготовлення кам'яних рубил і відщепів, будівництво куренів і застосування «дикого вогню».
3. 100 – 40 тис. до н. е. (мусть'єрська культура) – виготовлення складних знарядь (кам'яних сокир, списів і наконечників, дротиків); оволодіння технікою свердління і добування вогню тертям.
4. 40 – 12 тис. до н. е. (пізній палеоліт) – виготовлення кам'яних і кістяних знарядь в оправах та з рукоятками, механічних пасток і списометальних засобів.
5. 12 – 7 тис. до н. е. (мезоліт) – виготовлення мікролітів, винайдення лука і стріл, риболовного гачка, сіток, волокуш і човнів-довбанок.
6. 7 – 4 тис. до н. е. (неоліт) – винайдення коловерті, колеса, сапи, серпа і зернотерок; зародження ткацтва, виробництво цегли і гончарних виробів, будівництво бурдеїв (землянок) і споруд на палях.

2.2. Підсумки розвитку античної техніки (IV тис. до н.е. – V ст.)

1. Остаточний перехід від кам'яних знарядь до металевих; розвиток ремісничого виробництва та відокремлення його від землеробства.
2. Освоєння та розвиток металургії бронзи та чавуну, способів виробництва заліза та його насичення вуглецем; виробництво бронзових, а потім сталевих знарядь та зброї.

3. Удосконалення лука та настання епохи «залізного меча»; поширення бойових колісниць, метальних та стінобитних машин, штурмових веж.
4. Налагодження виробництва бронзового, а потім сталевого металорізального та деревообробного інструменту.
5. Механізація виготовлення керамічного посуду: винахід гончарного кругу; винахід ткацького верстата та розширення виробництва тканин.
6. Розвиток та вдосконалення гужового та водного транспорту, використання возів та колісниць, будівництво кораблів, їх оснащення вітрильним обладнанням.
7. Розширення виробництва будівельних, вантажопідйомних механізмів і сільськогосподарського інвентарю; винахід металевого плуга.
8. Зростання міст та поверховості будівель, розширення виробництва будівельних матеріалів; зведення пірамід, оборонних споруд, каналів, дамб, гребель, водопроводу.
9. Удосконалення клиновидного письма та поява фінікійського алфавіту; відокремлення розумової праці від фізичної і зародження природничих наук.
10. Початок видобутку солі та її вживання в їжу, освоєння технології консервування та заготівля продуктів про запас.

2.3. Підсумки розвитку середньовічної техніки (V - XVI ст.)

1. Поєднання науки з практикою та становлення експериментальної науки, розвиток ремісничого виробництва та зародження мануфактур.
2. Розвиток механіки; поява водяних млинів та вітряків, винахід механічних годинників, їх поширення.
3. Розвиток гірничої справи, перехід на двоступінчастий спосіб виробництва сталі; вдосконалення ливарного виробництва та металообробки.
4. Розвиток військової техніки; застосування запальних та вибухових сполучень, винахід та виробництво пороху, поява вогнепальної зброї.
5. Розвиток будівельної техніки та розширення виробництва будівельних матеріалів.
6. Розвиток текстильного виробництва, поява механічних прядильних та вдосконалених ткацьких верстатів горизонтального типу.
7. Впровадження металевих знарядь у сільському господарстві, перехід від ручних до механічних знарядь.
8. Розвиток сухопутного та водного транспорту; перехід від гребного флоту до вітрильного, початок будівництва військових судів.
9. Удосконалення та розгортання виробництва паперу, розробка алфавіту та початок друкарства.

2.4. Підсумки розвитку техніки епохи мануфактурного виробництва (17 ст. – 1760 р.)

1. Остаточна заміна сиродутного способу виробництва заліза; переведення домен з деревного вугілля на кокс, вдосконалення дуття, розвиток ливарної справи та початок виробництва сортового заліза.
2. Становлення і розвиток мануфактурного виробництва, заснованого на ремісничій техніці; суспільний поділ праці, вузька спеціалізація працівників та знарядь праці.
3. Удосконалення свердлильних та токарних верстатів, винахід суппорту, використання приводу від водяного колеса. Поява горизонтально-розточувальних верстатів та верстатів для глибокого свердління.
4. Зародження експериментальних методів фізичних та біологічних досліджень, перші наукові праці з електрики та магнетизму.
5. Створення автоматичних пристроїв керування на базі механічного годинника.
6. Удосконалення вогнепальної зброї та її поділ на ручну та артилерійську, поява нарізної та казенно-зарядної зброї.
7. Перший етап створення парового двигуна та спроби його практичного застосування.
8. Поява засобів громадського транспорту – диліжансів, омнібусів.
9. Початок механізації текстильного виробництва, поява механічних прядильних машин із приводом від водяного колеса.
10. Удосконалення технології виробництва паперу та подальший розвиток друкарства.

2.5. Техніка епохи промислового перевороту (1760 – 1870 рр.)

1. Різкий стрибок у розвитку продуктивних сил як результат промислового перевороту та переходу від мануфактурного до фабричного виробництва та застосування систем машин.
2. Подальше вдосконалення гідротехнічних установок, їх використання для водопостачання та механізації виробничих процесів у гірничодобувних та переробних галузях виробництва.
3. Розвиток металургії та ливарного виробництва, удосконалення доменних печей. Використання досягнень металознавства для розширення виробництва високоякісних сталей.
4. Зростання машинобудівного виробництва та обсягу металообробки, збільшення парку та розширення номенклатури металорізального обладнання. Впровадження стандартизації та взаємозамінності деталей машин.

5. Розробка та вдосконалення паросилових установок, їх виробниче застосування та перехід до серійного виготовлення. Створення та розгортання будівництва паровозів і пароплавів, винайдення парових та гідравлічних турбін.
6. Розгортання будівництва залізниць, налагодження парового судноплавства та будівництво каналів. Поява парового безрейкового транспорту, винахід та налагодження виробництва велосипедів. Перші досліди щодо застосування двигунів внутрішнього згорання (д.в.з.) на транспорті.
7. Винахід, налагодження виробництва та розширення застосування сільськогосподарських машин з кінним, а потім і паровим приводом: металевого плуга, механічних жниварок, молотарок та перших комбайнів.
8. Створення та розширення виробництва будівельної та гірничопрохідної техніки: одно- та багатоковшових екскаваторів, стрічкових та ланцюгових транспортерів, парових підйомників, пневматичних перфораторів та ін.
9. Механізація виробництва тканин, створення високопродуктивного прядильного обладнання та ткацьких верстатів, удосконалення технології відбілювання та фарбування тканин.
10. Удосконалення конструкцій та налагодження виробництва вогнепальної зброї, перехід до нарізної зброї та виробництва сталевих гармат, розробка конструкцій бойових ракет. Винахід багатозарядної гвинтівки та револьвера, бездимного пороху та динаміту.
11. Зародження нової науки – електротехніки; розробка перших електричних машин і способів передачі електроенергії на відстань. Винахід електричного та семафорного телеграфу, налагодження телеграфного зв'язку.
12. Використання досягнень хімічної науки та зародження анілінофарбової промисловості, виробництва целюлози для виготовлення паперу та пластмас.
13. Винахід літографії, фотографії, сталевого пера, олівця та друкарської машинки, вдосконалення друкарських машин та іншого друкарського обладнання, розширення випуску друкованої продукції.

2.6. Підсумки розвитку техніки епохи індустріалізації (1870 – 1940 рр.)

1. Переворот у природознавстві, швидке зростання техніки та впровадження нових винаходів і відкрить; перехід до масового безперервно-

потокового виробництва, прогресуюча мілітаризація економіки провідних держав.

2. Інтенсивний розвиток електроенергетики та електротехніки, будівництво електростанцій та передача електроенергії на відстань, застосування електродвигунів на транспорті та в стаціонарних машинах.
3. Витіснення паровою турбіною та д.в.з. парової машини та створення автотракторної техніки на базі д.в.з.
4. Витиснення заліза виробництвом сталі, розробка томасівського способу, виникнення електрометалургії та розробка електролітичного способу одержання алюмінію та інших кольорових металів. Розширення виробництва високоякісної та легованої сталі.
5. Розширення та вдосконалення видобутку та переробки вугілля та нафти. Початок хімічної переробки вугілля. Впровадження ерліфту та газліфту для видобутку, трубопроводів для транспортування та крекінг-процесу для нафтопереробки.
6. Початок механізації сільського господарства та застосування у землеробстві тракторів з д.в.з. і комбайнів, а також нової техніки для зберігання, перевезення та переробки сільськогосподарської продукції.
7. Удосконалення водного транспорту та витіснення вітрильного флоту паровим. Підвищення тоннажності суден, початок їх оснащення паровими турбінами та дизельними д.в.з., поява криголамів. Створення потужних військових флотів та їх оснащення гігантськими лінкорами, броненосцями та підводними човнами.
8. Зародження авіації та створення літальних апаратів легше повітря (дирижаблів) та важчих за повітря (аеропланів), оснащення їх д.в.з. і систематичне застосування для воєнних цілей. Бойове застосування ракет і зародження ідеї їх використання для польотів у космічному просторі.
9. Удосконалення телеграфу та засобів зв'язку, винахід радіо і телефону, виникнення електроніки. Вдосконалення поліграфії, винахід фонографа та грамофона, створення та розвиток кінематографу.
10. Прогресуючий приріст залізничної мережі, будівництво тунелів і вдосконалення конструкції паровозів, початок використання електротяги та тепловозів. Розвиток міського безрейкового транспорту (автомобільного) та рейкового наземного (трамвайного) та підземного (метро).
11. Випереджувальний розвиток військової техніки, налагодження виробництва бездимного пороху, вибухових і отруйних речовин. Повний перехід на нарізну артилерійську та стрілецьку зброю, поява

автоматичної зброї. Нарощування броненосної техніки на суші (танків, бронеавтомобілів) і на морі (броненосців, лінкорів та суперлінкорів).

12. Технічні успіхи у сфері будівництва та благоустрою. Розширення висотного будівництва та застосування ліфтів, використання конструкцій зі сталі та залізобетону. Витіснення газового та гасового освітлення електричним, застосування центрального водопостачання, опалення та каналізації.

3. Нариси з історії приладів

3.1. Класичний період

Перші прилади, ранній етап. До перших приладів належить сонячний годинник, згадки про який відносимо до 3 тис. років до н. е. (Індія, Єгипет та Китай); цей прилад вимірювання часу не втратив свого практичного значення включно до наших днів. Пізніше, у 1 ст. до н. е., були створені водяні годинники (клепсидри), за допомогою яких можна було визначити час у будь-який час доби і в будь-який погоду по кількості рідини, що витікає або перетікає за період реєстрації. На цьому принципі заснований і створений пісочний годинник, яким іноді користуються, наприклад медики, і по цей день.

Найпершим астрономічним приладом був компас (лат. compasso – вимірюю), перше згадування про нього з'явилося в китайському літописі в 3 ст. до н. е. В 1–2 ст. н.е. компас знайшов широке розповсюдження в Китаї під назвою «показник півдня». Стрілка такого показника підвішувалась на нитці або кріпилась на корку, що плаває в судині з водою.

Кінцева конструкція компаса формалізована лише в 14 ст., коли стрілка була встановлена на голку та укладена в засклений корпус.

У 2 ст. до н.е в Китаї з'явилася астролябія (гр.astron зірка + labe охоплювати) – кутомірний прилад, який використовувався до 18 в. для визначення положення небесних світил. В 2 ст. Чжан Хзон винайшов глобус (від лат. globus сфера) і сейсмограф (гр. seismos землетрус + grapho пишу) – прилад для запису коливань земної поверхні при землетрусах.

Отже, перші прилади, розглянуті вище, були важливі не тільки самі по собі, але їх поява ознаменувала прогрес у розвитку людства, поширення особливого класу пристроїв, які дозволяють отримувати людиною інформацію з навколишнього світу і які в подальшому отримали назву «прилад».

Розвиток другого етапу розгортається з великою затримкою – рубіж X століття

Механічні системи. Їх початок закладений механічним годинником, який по суті є другим винаходом за важливістю, після млина, в епоху ремісництва (IX ст. і далі). *Годинники* – це перший автомат, створений по задуму для практичних потреб, а в подальшому зіграв незмірно велике значення у розвитку техніки. На їх основі отримала розвиток вся теорія виробництва, яка побудована на рівномірному русі.

Історична довідка. У X ст. вчений чернець Герберт (згодом – це папа Сильвестр II) розробив перший механічний годинник з приводом тягаря (гир). Спочатку вони мали одну стрілку і у вигляді баштових годинників були поширені в XIII–XIV ст. та слугували тоді в основному церкві – сповіщали боєм час богослужіння. Основним елементом баштового годинника був заводний барабан, на який намотувались канат або ланцюг з підвішеним на кінці тягарем. Усередині барабана монтувався механізм, що забезпечує його рівномірне обертання при повільному о пусканні тягарю. На відміну від безлічі інших механізмів, які в середні століття виконувалися переважно як дерев'яні конструкції, всі деталі годинників з самого початку робилися з металу. Крім того, створення годинника вимагало теоретичних розрахунків і застосування математики, що забезпечило поєднання науки з практикою. Надалі відбувалося не тільки вдосконалення годинникових механізмів, а й створення на їх основі різних автоматичних пристроїв. Пізніше, в XV ст., з'являються механічні настільні годинники, а в XVI ст. і кишенькові (так звані шпиндельні). Їх автором вважається німецький винахідник І. Хенлен, який використав пружинний завід. Такий годинник був значно досконаліший середньовічних баштових, але разом з цим показував дуже наближений час. Визначальну роль у розвитку маятникових годинників зіграли праці Галілео Галілея, присвячені цьому питанню. Галілей відкрив синхронізм коливань фізичного маятника, але кардинальний переворот в годинниковій техніці справив нідерландський учений Христофор Гюйгенс. В 1637 р. він перший застосував в годиннику маятник як регулятор ходу, а також винайшов балансир зі спіраллю і анкерним спуском для кишенькового годинника. Їм була написана спеціальна книга «Маятникові годинники», що є зразком поєднання наукової теорії з практикою.

Отже, остаточно ера годинників наступила завдяки винаходам Х. Гюйгенса.

На основі годинникових механізмів почали створюватися автоматичні обчислювальні прилади, попередники сучасних калькуляторів і інших обчислювальних машин. Б. Паскаль, автор теорії імовірності, в 1641 – 42 рр. сконструював сумуючу машину для механізації операцій додавання і віднімання, а математик Г. Лейбніц в 1667 р. винайшов рахункову машину, що стала зразком для подальших робіт в цій галузі.

Іншим напрямком використання годинникових механізмів було створення «андроїдів», (за іменем Анрі Дро), або «людиноподібних» автоматів. Цей напрямок було пов'язано з розвитком «механіцизму» і спробами філософів поширити закони механічного руху на живу природу. Самі ж автори бачили в своїх винаходах лише дотепні механізми, практичний засіб докладання своїх знань і таланту. До кінця розглянутого періоду було створено безліч «Андроїдів», з яких найбільший захват сучасників викликали «Пурхання качки», «Флейтист» і «Барабанщик» французького механіка Жака Покансона (1730–40), а також «Малювальник» і «Писар» вже названих швейцарських годинникових майстрів – братів П'єра і Анрі Дро. У 1774 р. «андроїди» братів Дро на виставці в Парижі мали неабиякий успіх, але коли Анрі повіз їх до Іспанії, то свята інквізиція звинуватила його в чаклунстві та надовго запроторила за ґрати.

Акцентуємо, що в основі механічної бази розвитку приладобудування є *елементарні механізми перетворення руху*.

Атмосферні та теплові явища. У 1644 р. Е. Торрічеллі винайшов ртутний барометр (грец. Baros – тяжкість + метр), за допомогою якого відкрив існування атмосферного тиску і вакууму. Ці розробки отримали назву «торрічелевої порожнечі». У 1650 р. Отто фон Геріке, бургомістр Магдебурга, винайшов повітряний насос – «пневматичну машину», за допомогою якої проведені досліди з «магдебурзькими півкулями», які не змогли розчепити шестеро коней, наочно довів наявність атмосферного тиску.

Вивчення теплових явищ, а потім і експериментування з тепловими двигунами, зажадали створення спеціальних приладів для вимірювання температур. Один з перших таких приладів, названий «термоскопом », був створений Галілеєм. Пріоритет у створенні практично придатного спиртового (1709), а потім ртутного (1714) термометрів (від грец. thermos – теплий + metros – міряю) належить німецькому фізику Д. Фаренгейту, який запропонував також і температурну шкалу, названу його ім'ям. Пізніше свої шкали запропонували французький вчений Р. Реомюр (1730) і шведський вчений А. Цельсій (1742).

Оптика. Інтерес до оптики викликаний застосуванням оптичних приладів у ближній зоні: па початок окуляри, а далі лупа та згодом й мікроскоп. У дальній зоні спостереження першою була зорова труба.

Термін «мікроскоп» (грец. mikros – малий, skopeo – дивлюся) був уведений в 1614 р. римським академіком Лінкеїв. Розробку мікроскопа завершив Галілей; він же винайшов і телескоп (грец. Tele – далеко (даличина) + skopeo – дивлюся). Створенню оптичних приладів сприяв розвиток оптики як найважливішого розділу фізики. Зокрема, Х. Гюйгенс розробив хвильову

теорію світла, пояснив подвійне променезаломлення; він удосконалив телескоп і винайшов зоровий окуляр, названий його ім'ям. Для отримання зображення об'єктів і подальшого їх зарисовки почала застосовуватися камера-обскура (лат. obscurs – темний) – світлонепроникна коробка (камера) з невеликим отвором в центрі однієї з стінок, через який предмет проектувався на протилежну внутрішню. Цей прилад є прототипом сучасного фотоапарата, але до його винаходу камера-обскура тривалий час використовувалась як приладдя для точних натурних зарисовок.

З 1660-х рр. у Голландії починає розгортатися виробництво найбільш затребуваних на той час приладів, в першу чергу оптичних, серед яких одна з перших, як зазначалось, була зорова труба отримала в XVII ст. найбільшого поширення в армії й на флоті і яка згодом була витіснена біноклем.

Начальні досліди з електрикою. Перші відомості про електризацію тертям і деякі властивості природних магнітів були відомі ще в VII–VI ст. до н. е. На початок XVII ст. інтерес до електрики став загальним і в середовищі вчених він став навіть предметом моди. В 1600 р. з'явився перша праця У. Гільберта «Про магніти, магнітні тіла і про великий магніт Землі», в якому вперше з'явився термін «електрика» (від грец. elektron – янтар). У 1747 році американський вчений Б. Франклін, один з піонерів досліджень атмосферної електрики, розробив унітарну теорію атмосферних електричних явищ, винайшов блискавковідвід (1752) і плоский конденсатор. У 1752–53 рр. російські вчені М.В. Ломоносов і Г.В. Ріхман досліджували атмосферну електрику за допомогою «громових машин». За результатам експериментів була опублікована (1753) робота Ломоносова «Слово про явища повітряні, що від електричної сили походять», а Ріхманом ще в 1745 р. був винайдений «електричний покажчик»; згодом академік Ріхман загинув під час ураження блискавкою. Інший російський фізик, академік Ф.У. Епінус, досліджував піроелектрику і в своїй праці «Досліди теорії електрики і магнетизму » здійснив першу спробу математичного трактування електричних і магнітних явищ. В цей період практичного використання електрична енергія не набула, за рідкісними винятками. Так, в Чехії в 1745 р. був вперше установлений блискавковідвід для захисту від руйнівного впливу прямого попадання блискавки, який в просторіччі неправильно називають громовідвід.

Названі дослідження та завдяки першому систематизованому курсу фізики П. Мушенбрука (1739 р.), виникла потреба в інших виробах, зокрема електричних; першим став електричний конденсатор, розроблений і виготовлений автором книги, названий ним «лейденською банкою» в честь м. Лейдена, де він проводив свої дослідження. В 1750-72 рр. Отто фон Геріке винайшов і виготовив перші електростатичні генератори, так названі електрофори, а також прилади для

вимірювань статичної електрики, над створенням яких пізніше трудився французький фізик Люфі.

Перші кроки в дослідженні електрики аж до кінця XVIII ст., були пов'язані з електростатикою.

В Англії у 1735 р. були опубліковані перші пропозиції по створенню електростатичного телеграфу, але перша телеграфна лінія між містами Мадрид і Аранхуес була побудована іспанським інженером Ф. Сільва лише в 1785 р., півсотні років по тому.

Зародження та становлення електротехніки. Початок був покладений французьким фізиком (Луї) Кулоном, який відкрив в 1785 р. закон електростатики, названий його ім'ям, і який дослідив взаємодію зарядів за допомогою ним же винайдених (1784) крутильних ваг.

У 1791 р. вийшла робота італійського фізіолога Л. Гальвані «Про тваринну електрику», де вперше стало фігурувати поняття різниці потенціалів. Від прізвища Гальвані походить безліч термінів в електротехніці: гальванометр, гальванотехніка, гальванопластика і т. п.

Величезне значення мало створення в 1800 р. італійським фізиком А. Вольта першого хімічного джерела струму під назвою «вольтів стовп». За його допомогою російський електротехнік В.В. Петров в 1802 р. відкрив електричних дугу і вказав на можливість її практичного використання – електричне зварювання металу. Він же перший спостерігав плазму – явище електричного розряду в вакуумі, досліджував хімічну дію струму, електричні явища в газах, електропровідність і люмінесценцію. У 1807–09 рр. англійський учений, засновник електрохімії Г. Деві також досліджував електричну дугу і використанням електролізу отримав цілий ряд хімічних елементів. Вже на цьому рівні електрика знайшла застосування у військовій справі. В 1812 р. російський вчений П.Л. Шилінг провів успішні досліди по електричному підриві мін. У 1821 р. німецький фізик Т. Зеєбек відкрив явище виникнення термоелектрорушійній силі в замкнутому електричному ланцюзі, складеної з послідовно з'єднаних різнорідних провідників струму, спаї яких знаходяться при різних температурах. «Ефект Зеєбека» згодом став використовуватися в термоелементах, що застосовуються у вимірювальній і холодильній техніці, термогенераторах тощо.

Розвиток електротехніки

Період 1830 –70 рр. виділяється як час розвитку електротехніки, появи електричних машин постійного струму і закладення основ електромеханіки. Початок електротехніки поклав англійський фізик М. Фарадей, який відкрив (1831) явище електромагнітної індукції, пара- і діамагнетизму, а також закони електролізу (1833–34). Д. Максвелл, розвиваючи в 1860–70-х роках ідеї

Фарадея, створив теорію електромагнітного поля, передбачив існування електромагнітних хвиль, розробив електромагнітну теорію світла і встановив статистичний розподіл молекул однорідного одноатомного ідеального газу за швидкостями, названого його ім'ям. У першій половині XIX ст. найбільшого поширення в якості джерел постійного струму отримали гальванічні елементи різних систем і акумулятори, в яких хімічна енергія перетворювалася в електричну. Спочатку їх практичне використання обмежувалося телеграфним зв'язком, гальванопластикою та електровибуховими пристроями для підривних робіт. Але надалі такі джерела невдовзі перестали задовольняти безперервно зростаючі побутові потреби та виробництво.

Паралельно з удосконаленням джерел струму відбувалася розробка конструкцій електродвигунів – машин для перетворення електричної енергії в механічну. Відкриття Фарадея підказало новий спосіб одержання електричного струму за допомогою магнітоелектричного генератора. На цих проблемах і зосередилися зусилля вчених і винахідників у галузі електротехніки.

Але, на відміну від теплоенергетики, що міцно зайняла своє місце в сфері виробництва, електроенергетика робила в цьому напрямку лише перші кроки. Передумовами широкого застосування цього нового виду енергії стало створення динамо-машини на основі самозбудження, надійного електро-двигуна і освоєння способів передачі потужних струмів по дротах. У 1834 р. російський вчений В.С. Якобі перший винайшов електродвигун і через чотири роки випробував його для приводу руху судна. Одночасно з Е.Х. Ленцем, досліджуючи електромагніти, встановив зворотність електро-магнітного циклу. Останнє відкриття дозволило створити практично придатний електродвигун, так як перші його зразки в принципі перетворення прямолінійно-зворотного руху в обертальний повністю копіювали парову машину. У 1854 р. датчанин Хіорт створив генератор з самозбудженням, а в 1869 р. бельгієць З. Грамм розробив у Франції перший практично придатний генератор постійного струму з кільцевим якорем і заснував промислове виробництво електричних машин.

До розглянутого періоду відносять зародження гальванотехніки – галузі прикладної електрохімії (закони Фарадея). Засоби гальванотехніки, використовуючи електролітичне осадження металів на поверхню металевих і неметалевих виробів, дозволяли виготовляти точні кліше для друку грошових знаків і цінних паперів, також для декорації металевих виробів, статуй і барельєфів.

Фотографія: народження і смерть живопису. Важливим моментом у прогресі людства стало винайдення фотографії (від грец. photos (світло) + grapho (пишу)). Концепція отримання зображень з натури на спеціальне

полотно була описана в літературі Де Ла Роше (de la Roche) приблизно за сто років до фактичного винаходу фотографії. Перший в історії справжній фотознімок був зроблений в 1826 році Жозефом Ньєпсом (Joseph Niepce). Однак цей метод дозволяв отримувати знімок лише в одному екземплярі, вимагав тривалої експозиції витримки при зйомці (до 8-ми годин) і громіздкої апаратури, вага якої досягала 50 кг, тому не отримав подальшого розвитку і поширення. Ньєпс хотів отримати зображення на літографському камені так, щоб можна було друкувати на олов'яних пластинах, що значно полегшило б гравіювання форми на металевому циліндрі. Багато з ранніх винахідників фотографії працювали над її використанням у процесі репродукування зображень.

Практично придатний спосіб фотографії – дагеротип, в якій світлочутливим шаром виступив йодид (бромід) срібла, розробив в 1839 році французький винахідник Л. Дагер, ґрунтуючись на дослідах свого співвітчизника і партнера Ж. Ньєпса. Пізніше, Дагер (Daguerre) продав права на використання нового процесу, який назвали дагеротипією, французькій владі. Час, необхідний для виготовлення зображення, скоротився до однієї години. Іншим значним винахідником був Фокс Толбот (Fox Talbot), який виготовив перший негатив на скляній пластинці в 1835 році. З нього можна було отримати будь-яку кількість позитивних відбитків на світлочутливому матеріалі. Це привело до відомого нам прогресу відтворення фотозображень і до його практичного використання в поліграфії.

До кінця XIX століття час експонування становив уже секунди, гнучка плівка була вдосконалена Джорджем Істменом (George Eastman), а репродукції зображень з натури і творів художників стали видаватися як ніколи раніше.

Одночасно розроблялися різні конструкції об'єктивів для фотокамер, з яких найбільш досконалим виявився портретний об'єктив, розроблений в 1840 р. австрійським вченим І. Пецвалем. У 1868 р. француз Л. Дюко де Орон винайшов кольорову фотографію. З цього часу фотографія починає використовуватися як в поліграфії, так і в науці, техніці, та й в побуті.

Поява літаків, а також створення спеціальних аерофотоапаратів забезпечило розвиток нового напряму в фотографії – аерофотозйомки, яка набула особливо широкого поширення в геодезії і картографії. Перший аерофотоапарат сконструював льотчик В.М. Потті, в 1913 р. У 1916 р російський винахідник Е.Е. Горін винайшов електрофотографічний апарат, в якому зйомка проводилася на спеціальному електрочутливому папері, який під впливом світла змінює свої електричні властивості. Електрофотографія

справила буквально переворот в фототехніці, фототелеграфії, поліграфії, електронно-обчислювальній та ін. галузях техніки.

Виникнення кінематографу; розробка техніки звукозапису. Кінематограф (від гр. kinĕma (kinĕmatos) – рух, grapho – пишу) базується на властивості людського ока утримувати зорове сприйняття мигаючих об'єктів (закон Тальбота), при відтворенні яких створюється ілюзія руху. Найбільш вдала спроба демонстрації «рухомих картинок» за допомогою проекційного апарату в 1853 р. належить австрійцю Ф. Ухашгусу. Однак практичне рішення ця проблема отримала розв'язок завдяки більш пізніших досягнень фототехніки, механіки, електротехніки та хімічної технології.

У 1870-х рр. створюється хронографічна апаратура, один з яких («фотографічний револьвер»), виконував 48 знімків за 72 с, створив в 1874 р. французький астроном Ж. Жансен. Десять років по тому такі апарати вже могли знімати з частотою: 10–20 зображень в секунду на скляну пластинку.

Важливим моментом для кінематографії був винахід целулоїду, який до 1900 року вироблявся в листах. З появою прозорого целулоїду від фотографування на окремі скляні пластинки перейшли до фіксації знімків на целулоїдні стрічки, нарізані з листів і звані «плівками» (фото- і кіноплівки). Звідси і походить слово «фільм» (англ. Film – плівка) – послідовність розташованих на кіноплівці фотографічних зображень – так званих кадрів.

Над створенням апарату, названого кінематографічним, працювали багато винахідників в різних країнах: Т. Едісон, Ж. Лерій, У. Латам, Т. Армет в США; І, А. Тимченко і М.Ф. Фрейденберг в Росії, Ф. Поул в Англії та ін. Але найбільшого успіху домоглися брати Люм'єри з Ліона, Луї-Жан і Огюст, які створили в 1895 р прототип проекційного апарату для демонстрації знятих фільмів. В цьому ж році О. Люм'єр і електротехнік Ж. Каркання створили перший досить надійний механічний кінознімальний апарат. Першу спробу озвучування кінофільмів зробив Едісон; він спробував синхронізувати зображення зі звуком, записаним на фонограф. Здійснити таку синхронізацію йому вдалося в апарату, названому *кінетофоном*, але він виявився досить складним, до того ж у міру зносу стрічки синхронність звуку і зображення швидко втрачалася. Тому в цей період кіно залишалося переважно німим і найчастіше пожвавлювалося музичним, вокальним або шумовим супроводом з використанням грамофона.

Незважаючи на явні технічні недоробки, кінопромисловість за темпами свого розвитку поступалася лише військовій. У 1912 р. тільки в США «Кінемотеатри» за рік відвідало більше 5 млн. людей. В Англії цього часу діяло понад 4 тис. кінотеатрів (приблизно 400 в Лондоні). В Росії до 1915 р. прокатом фільмів займалися 42 фірми, а кількість кінотеатрів досягло 1500.

Видатними досягненнями розглянутого періоду було винайдення апаратів для механічного запису і відтворення звуку фонографом і грамофоном.

Фонограф (грец. Phone (голос, звук, шум) + grapho) – перший механічний прилад для запису і відтворення звуку створив Едісон і незалежно від нього французький вчений Ш. Кро. Запис в фонографі здійснюється на восковому циліндрі, що обертається з постійною швидкістю, за допомогою коливної голки, сполученої зі слюдяною мембраною, рух якої збуджується звуковими коливаннями. Відтворення записаного здійснювалося тією ж мембраною, що вібрує при обертанні циліндра і переміщенні голки по попередньо накресленій борозенці. Спочатку обертання циліндра фонографа здійснювалось вручну, пізніше для цього був пристосований годинниковий механізм, а з кінця 1880-х рр. – електродвигун. Згодом Едісон запропонував замість циліндра проводити запис на платівці. Фонограф не отримав широкого застосування, так як незабаром йому на зміну прийшов досконаліший грамофон.

Грамофон (від грец. Gramma – запис + phone) був запатентований американським винахідником Е. Берлінером в 1888 р. і спочатку називався фонограм. Основною відмінністю грамофона від фонографа була запропонована винахідником грамофонна ебонітова платівка, яку можна було відтворювати в необмеженій кількості примірників з записів, виконаних на диску.

Спочатку платівки випускалися односторонніми, а з 1903 р. перейшли на випуск двосторонніх. Далі з’являється назва портативного різновиду грамофона – «патефон» (з назви фр. фірми Пате + фон), або «грамофон Пате».

У 1900 р. датський інженер В.Поульсен представив на виставці в Парижі новий апарат, названий їм телеграфоном – попередником магнітофона. Він призначався для запису телефонної розмови з подальшим її відтворенням. Звукові коливання, перетворені в магнітні, записуються на основі явища залишкового магнетизму, на рівномірно натягнутий сталевий дріт, що переміщується, який заміняв тоді магнітну стрічку. З 1935 р. пластикова магнітофонна стрічка з магнітним покриттям фірми АЕГ починає наполегливо витісняти електрофони з грамплатівками, по світу починається хода магнітофонів.

Розвиток техніки зв’язку. Початок розвитку зв'язку по праву належить системі візуального зв'язку, яка зародилася ще в давнину в вигляді сигнальних багать, які запалювались послідовно на відстані прямого бачення. Цю систему зараховують до оптичного, яка отримала технічний розвиток через багато століть в першій чверті XIX ст. в Європі з використанням семафорної абетки. Винахідником останньої вважається французький механік Клод Шапп (1793), за проєктом якого в 1794 році була побудована перша телеграфна лінія Париж–Лілль, а в 1798 р. Париж–Брест. В Англії у 1735 р. були опубліковані

перші пропозиції по створенню електростатичного телеграфу, але перша телеграфна лінія між містами Мадрид і Аранхуес була побудована іспанським інженером Ф. Сільва лише в 1785 р., півсотні років по тому.

Передавальний пристрій оптичного телеграфу представляє систему рухомих крил або рейок і ліхтарів, які запалюють вночі або в похмуру погоду. Лінія оптичного телеграфу складалася з ланцюжка станцій (веж), віддалені один від одного на відстані прямої видимості (до 30–40 км). Кожна така станція за допомогою спеціального коду приймала депешу (фр. Depeche – спішне повідомлення, телеграма) і передавала її далі.

Телеграфний (від грець. tele (вдаль, далечінь) + grapho) ***зв'язок*** – передача на відстань дискретних (буквоцифрових) повідомлень з записом їх в пункті прийому. В Англії у 1753 р. були опубліковані перші пропозиції щодо створення електростатичного телеграфу, але перша телеграфна лінія між містами Мадрид і Аранхуес, як зазнчалось, була побудована іспанським інженером Ф. Сільва лише в 1785 р., майже через тридцять років.

В подальшому поширення отримав електромагнітний (стрілочний) телеграф, основи якого заклав російський винахідник П.Л. Шилінг, який продемонстрував свій апарат в 1832 р. Передача знаків в системі Шилінга проводилася за рахунок зміни положення стрілок в апаратах приймальної станції. За цією системою в 1833 р. в Геттінгені німецькими вченими К.Ф. Гаусом і В.Е. Вебером була побудована експериментальна лінія, а в Англії з невеликими змінами була застосована (1832) У.Ф. Куком і Ч. Уітстоном. Основним недоліком стрілочних телеграфних апаратів була відсутність фіксації знаків, що підлягають передачі.

У 1837 році американський винахідник С. Морзе розробив електромеханічний телеграфний апарат, що включає передавач – телеграфний ключ, а приймачем – електромагніт, який керує роботою пишучого механізму. Роком пізніше він же розробив «азбуку Морзе» – код, в якому кожен знак (буква) представлялися у вигляді комбінацій тире і точок за допомогою імпульсів електричного струму різної тривалості. Передача повідомлень здійснюється по проводах. Поряд з повітряними починають споруджуватися й підземні кабельні телеграфні лінії, протяжність яких безперервно зростала. У 1840-х рр. вступили в дію дві трансатлантичні кабельні лінії між Англією і США, потім кабельна лінія з'єднала Америку з Індією.

1970 рік. Оптоволоконна система зв'язку фірми «Корнінг Гласе» забезпечила можливість передачі світлового сигналу на величезні відстані. Створена світова навколоземна оптоволоконна мережева павутина величезних протяжностей; система використовується повсемісно, інтернетний зв'язок.

Дротовий зв'язок. Революційний поштовх становленню електричного зв'язку як провідного, так і бездротового, спонуканий бурхливим розвитком електроенергетики і електротехніки. Насамперед зазнав істотних вдосконалень вже відомий дротяний телеграф. Удосконалення стосувалися перш всього техніки фіксації інформації і збільшення швидкості її передачі. В 1855 році англійський винахідник Д. Юз винайшов букводрукарський телеграфний апарат, який отримав значне поширення. Через три роки його співвітчизник Ч. Уітстон сконструював перфоратор для пробиття отворів у стрічці, створив передавач, а в 1867 р. і приймач, завершив розробку власної приймально-передавальної системи, названої його іменем. Одночасно Стіріс винайшов так зване дуплексне телеграфування, що дозволяло одночасно вести передачу і прийом телеграм. Багато фахівців займалися проблемою послідовного багатократного (мультиплексного) телеграфування, що дозволяє передавати і приймати по одній і тій же лінії відразу кілька телеграм. Проте найбільших успіхів домігся французький винахідник Ж. Бодо, який на основі п'ятизначного коду в 1877 р. створив свій всесвітньо відомий апарат, названий його ім'ям. Його апаратура включала, крім п'ятикратного апарата, дешифратори, друкуючі механізми і розподільники.

Телефон. Одночасно з вдосконаленням дротяного телеграфу проводиться розробка нового засобу зв'язку, телефону (грец. tele – далечінь, далеко і phone – звук) – електроакустичного приладу, здатного перетворювати електричні коливання в звукові. Піонером у цій справі став німецький конструктор І. Рейс, який продемонстрував свій перший телефонний апарат в 1861 р., але тоді він не отримав практичного застосування. Справжнім же винахідником телефону вважається американський винахідник А. Белл, який в 1876 р. подав заявку на дві години раніше свого співвітчизника І. Грея. Вони обидва, беручи участь в конкурсі вирішення проблеми ущільнення телеграфних ланцюгів, виявили ефект телефонування і розробили практично застосовні конструкції телефонних апаратів.

У 1878 р. «Телефонною компанією Белла» в Нью-Хайвені була створена перша в світі телефонна станція. Через рік вже відомий Д. Юз, досліджуючи ненадійні електричні контакти, виявив їх коливання, які прослуховувалися в телефоні. Так він відкрив мікрофонний ефект і потім сконструював телефонний передавач, названий їм мікрофоном (mikros –малий + phone – звук). Його застосування в апаратах Белла дозволило усунути їх основний недолік – обмеженість радіусу дії. Ще дужче дальність передачі звуку вдалося збільшити завдяки винаходу Т. Едісона, який застосував вугільний мікрофон з пресованої лампової сажі і ввів в його схему індукційну котушку.

У 1882 р. російський винахідник П.М. Голубицький розробив високочутливий телефонний апарат з його включенням способом підняття трубки з корпусу – принципом, збереженим і в сучасних апаратах. Для подальшого розвитку телефонних мереж мала велике значення ідея Голубицького зі створення телефонної станції з живленням від центральної електробатареї, що дозволила створювати такі центральні станції, які розраховані на десятки тисяч абонентських точок. Інший російський винахідник К.А. Мосницький в 1887 р. створює автоматичний центральний комутатор – попередник автоматичної телефонної станції (АТС), але патент на таке отримав американський винахідник А. Строунджер двома роками пізніше. Кінець XIX – початок XX ст. ознаменувалися бурхливим будівництвом телефонних мереж і створенням АТС, кількість яких до кінця першого десятиліття XX в. перевищила 200 тисяч. Черговим поштовхом значного збільшення дальності передачі забезпечило установки проміжного підсилювального пункту і застосування дуплексної телефонної трансляції на тріодах, розробленої інженером В.І. Коваленковим в 1915 р.

Радіо. Одним з найбільших відкрить даного періоду був винахід радіо (лат. radiare – випромінювати, випускати промені) – способу передачі інформації на відстань за допомогою електромагнітних хвиль – радіохвиль, який спочатку називався «бездротового телеграфією». Пріоритет в цьому належить російському вченому А.С. Попову, який ще в 1889 р. вказав на можливість використання електромагнітних хвиль, що поширюються зі швидкістю світла, для бездротової передачі сигналів. У 1895 р. ним продемонстровано винайдений ним перший в світі радіоприймач, що став родоначальником всіх приймальних приладів іскрової «бездротової телеграфії». Але патент на радіоприймач, тотожний «грозовідмітнику», винайденому в 1895 р. А. С. Поповим, вдалося отримати в 1897 р. італійському радіотехніку Т. Марконі. Трохи пізніше (в 1902–04 рр.) датський винахідник В. Поульсен сконструював новий вид передавача з дуговим генератором незатухаючих коливань, що дозволило ввести радіозв'язок в армії (на суднах, літаках, танках та ін.).

1935 рік; радіолокаційна станція далекого виявлення Уотсона-Уатта дозволяла виявляти наближення повітряних цілей до рубежів; починаючи з 1940 року, спосіб зіграв визначальну роль у захисті кордонів в Англії у Другій світовій війні від руйнівних ворожих бомбардувань.

Зародження телебачення. У початковий період свого розвитку вступило і телебачення, основою якого стала розвивається електроніка, що бурхливо розвивалась. Термін «телебачення» (грец. tele – вдалину, далеко + лат. visio –

бачення), першим ввів у вживання російський військовий інженер Костянтин Перскі в 1900 р., але він прижився не відразу і з'явився на Заході лише в 1909 р. Принципові основи телебачення були закладені португальським вченим А. Пайва (1878) і російським ученим П. І. Бахметьєвим (1880), який назвав його «електричним телефотографом». Вони, незалежно один від одного, висунули принцип перетворення елементів зображення в електричні сигнали з подальшою передачею та зворотним перетворенням в пункті прийому. У 1884 р. німецький інженер Ніпков розробив так званий електричний телескоп, в якому був вперше застосований принцип механічної розгортки зображення за допомогою диска з отворами, розташованих по спіралі. З тих пір він ліг в основу майже всіх телевізійних систем з механічною розгорткою. У 1897 р. німецький фізик К.Ф. Браун сконструював електронно-променеву трубку для дослідження електричних коливань, використовуючи винаходи Брауна. Б. Л. Розінг в Росії в 1907 р. розробив першу електронну систему відтворення телевізійного зображення, передавання якого він здійснив в 1911 р. Однак у той час телебачення робило лише перші кроки і, на відміну від радіо, не знайшло практичного поширення.

В Америці вперше здійснюється радіопередача нерухомого зображення Дженкінса, що стало значним кроком до сучасного телебачення. Через 2 роки він же здійснив телепередачу рухомого зображення. До речі, в 1925 році у Лондоні розпочались регулярні телепередачі через систему механічного телебачення. Система електронного телебачення запропонована російським інженером і винахідником В. К. Зворикіном, який емігрував у США.

Рентген. Вечір, п’ятниця 8 листопада 1895 рік. В. К. Рентген, німецький інженер-дослідник, спостерігає світіння зеленим кольором екрана катодної трубки, покритого платиноціанистим барієм. Промені, які викликали світіння, названі дослідником *Х-променями;* в подальшому вони отримали назву *рентгенівських*. 2 лютого 1896 рік, учений-електротехнік українського походження Іван Павлович Пулюй, уроджений містечка Гримайлів Тернопільської області, отримав перше зображення повного людського (дитячого) організму у *Х-променях* дуже високої якості. Х-промені В. К. Рентген спостерігав, імовірно, з використанням катодної трубки конструкції Івана Пулюя. У 1901 році Вільгельм Конрад Рентген отримав Нобелівську премію з фізики.

Зародження і розвиток електронної техніки. Величезне значення для розвитку приладобудування та радіотехніки зокрема мала поява на рубежі XIX–XX ст. електронних ламп, що ознаменувало появу електроніки як нової галузі науки і техніки. Початком електроніки було виявлення Т. Едісоном явища випускання електронів розжареною ниткою вакуумної електричної лампи, названого «ефектом Едісона». На основі цього у 1904 р. англійський учений Д.

Флемінг винайшов 2-електродну лампу (діод) і застосував її як перетворювач частот електромагнітних коливань (детектор) в радіотелеграфних приймачах. У 1906 році американський винахідник Л. Форрест розробив 3-електродну лампу (тріод). Її здатність посилювати і генерувати електромагнітні коливання, відкрита в 1913 році німецьким радіотехніком А. Мейснером, дозволила створити перший ламповий передавач, здатний передавати як телефонні, так і телеграфні сигнали. А підвищивши вакуум в тріоді, американські фізики І. Ленгмюр і Г. Арнольд значно збільшили його коефіцієнт посилення. Ленгмюр двома роками пізніше створив кенотрон – двохелектродну лампу, яка застосовується як випрямляч в джерелах живлення. Широкому впровадженні електронних ламп сприяла Перша світова війна з величезними потребами військ у засобах зв'язку.

Таким чином, до 1920 р. радіотехніка звелася на «лампові» ноги.

1919 рік. Перший тригер Джордана, Бонч-Бруевича та Іклза надзвичайно важливий перемикаючий пристрій; знайшов застосування головним чином у обчислювальній техніці та засобах автоматики.

1940 рік. Знаменний створенням точкового діоду з германію, який гарантував односторонню провідність електричного струму, так необхідну для роботи електро- і радіоапаратури.

1947 рік. Транзистор Бардина, Бертейна і Шоклі знаменував відкриття нової ери в галузі комп’ютерних технологій. Саме ці вироби стали основою для подальшого розвитку ЕОМ. В 1956 році усі троє дослідників були удостоєні Нобелівської премії.

3.2. Розвиток та становлення обчислювально-комп’ютерної техніки

3.2.1. Елементарна обчислювальна техніки

Спроби автоматизації обчислювальних процедур сягають у давнину; спочатку для спрощення рахункових операцій використовувались спеціальні дощечки, дещо пізніше – рахівниці, які зберіглися аж до 70-х років XX століття.

Подальший розвиток математики і ускладнення розрахунків зажадало їх механізації і відповідного розвитку обчислювальної техніки, що в подальшому було використано для побудови таблиць найрізноманітніших функцій. Ще в першій половині XIX ст. англійський математик Ч. Беббідж уперше зробив спробу побудувати універсальний обчислювальний пристрій, названий ним «аналітичною машиною». Вона замислювалась як механічний пристрій з пам'яттю і управлінням за допомогою програм, закладених у символи перфокарт – прямокутних карток з щільного картону та інформацією у пробитих отворах

(перфорації). Отже, Беббідж розв'язував проблему майбутнього комп'ютера, здійснити яку при тому рівні техніки не було можливим. Вона вирішувалася поетапно. Спочатку з'явилися прості рахункові прилади, в основному для додавання: Арцберг в Швеції (1866), В.Я. Буняковський в Росії (1867), Лейнер в Німеччині (1878), Патетик у Франції (1885). Найбільш досконалим виявився арифмометр («Однер – машина»), створений і запатентований російським винахідником В.Т. Однером в 1874 р. Слідом за цим відомий російський математик П.Л. Чебишев, який започаткував багато розділів математики та зробив чимало відкрить в галузі теорії механізмів, винайшов в 1876 р. арифмометр безперервної дії і сконструював до нього приставку множення і ділення (1881). Арифмометр Чебишева містив нові і плідні ідеї, але був не зовсім вдалий для практичного застосування.

Подальше вдосконалення рахункових, клавішних машин пов'язано з іменами американських інженерів Е. Фельта і Р. Таррана, які створили калькулятор на чотири арифметичних дії. Далі, американський інженер У.С. Барроуз створив запатентовану ним 1885 р. сумуючу «лістингову машину», в якій вперше застосував зручний клавішний спосіб введення даних; ця машина після вдосконалення забезпечувала роздруківку виконаних операцій. У 80-і рр. інший американський інженер Герман Холлеріт сконструював обчислювальну машину «Табулятор», в якій автоматизував процес обробки інформації, використовуючи перфокарти в якості носіїв інформації. У 1896 р. він заснував фірму з випуску обчислювальної техніки і перфокарт, яка згодом, в 1924 р., була перетворена у всесвітньо відому фірму IBM «International Business Maschines».

Пріоритет у винаході автоматичного карткового перфоратора (1907) належить американському інженеру Дж. Пауерсу.

У 1904 р. академік А.Н. Крилов в Росії запропонував конструкцію машини для інтегрування звичайних диференціальних рівнянь, яка була побудована в 1912 р. Слід зазначити, що до кінця XIX ст. усі обчислювальні машини були механічної дії. Далі розпочинається електромеханічний період у розвитку обчислювальної техніки, який тривав до 1940-х рр, після чого настала ера електроніки.

3.2.1. Становлення комп'ютерної техніки

1941 рік. Розробка релейної ЕОМ Z3 з програмним управлінням за проєктом інженера Цузе дозволила прискорити швидкість обчислювальні операції в декілька разів.

1944 рік. Родоводом програмного забезпечення сучасного персонального комп'ютера стала перша програма, закладена у пам'яті ЕОМ – програма «МАРК-

1» Айкена. Вона могла зберігати величезні за масштабами того часу об'єми інформації без втрати швидкості роботи комп'ютера.

1946 рік. Наступним кроком на шляху прогресу в обчислювальній техніці стала машина ENIAC–ЕОМ, створена під керівництвом конструкторів Маучлі і Екерта на основі електронних ламп. Швидкість обчислень у нового винаходу в порівнянні з Z3 зросла в 120 разів.

1951 рік. .Пам'ять для ЕОМ на магнітних стрижнях Форестера відкрила можливість зберегти значний об'єм інформації у пам'яті комп'ютера. Тепер програмісту не було потреби користуватись зовнішніми накопичувачами даних, застосовувались лише можливості ЕОМ.

1952 рік. В цьому році вперше заявила про себе фірма IBM, випустивши свою першу промислову ЕОМ – IBM 701. Надалі ця компанія займе провідні позиції на ринку комп'ютерних технологій.

1958 рік. Новим поштовхом у розвитку комп'ютера стало використання транзисторів – ЕОМ другого покоління. Ця архітектура дозволила значно зменшити габарити обчислювальної машини.

1964 рік. ЕОМ на інтегральних мікросхемах – наступна ступінь розвитку комп'ютера. В цьому ж році фірма IBM приступила до виробництва моделі IBM – 360, швидко витіснила конкурентів і стала найбільш популярною.

1969 рік. APRANKT – перша територіальна комп'ютерна інформаційна мережа; на початок складалася з чотирьох комп'ютерів і об'єднувала Каліфорнійський університет в Лос-Анджелесі, Каліфорнійський університет в Санта-Барбарі і університет Солт-Лейк Сіті в штаті Юта. Саме ця концепція об'єднання мереж в подальшому переросте в Internet.

1976 рік. Двома молодими американцями Джобсом і Возняком був створений персональний комп'ютер «APPLE». Ця ЕОМ в подальшому сформує підвалини для відкриття винахідниками власної фірми Apple Computer яка на сьогодні успішно конкурує з такими фірмами, як IBM і Microsoft.

1986 рік. NSFNET – перша високошвидкісна комп'ютерна інформаційна мережа, на базі якої і був створений глобальний міжнародний INTERNET.

Наведені нариси стосуються, так би мовити, стартового періоду розвитку людства – епохи відродження та початкової стадії світової індустріалізації. Ці розробки слугували трампліном для бурхливого індустріального розвитку сучасності та приладобудування зокрема. Сьогодні немає жодного відомого параметра фізичного поля, який би не був технічно забезпечений визначенню у стандартних одиницях вимірювальної величини.

Основні тенденції сучасного приладобудування:

1) перехід від аналогової обробки інформації до цифрової;

2) суцільна комп’ютеризація процесу обробки інформації в межах основних технічних функцій приладів.

3.3. Матричні цифрові фотоприймачі

3.3.1. Загальна інформація

В даний час до практичного використання розроблені два типи матричних цифрових датчиків: CMOS – компліментарний металооксидний напівпровідник (КМОН) та CCD-прилади із зарядовим зв’язком (ПЗЗ). Хоча технологія КМОН з’явилась раніше (1959 р.) за технологію ПЗЗ, але в подальшому остання завоювала беззаперечну перевагу внаслідок більш високої якості зображення і здобула основне місце для цифрових відеокамер. Одначе, внаслідок масового використання цифрових камер у мобільних телефонах, високі досягнення у напівпровідникових технологіях повернули у комерційне застосування КМОН-систем, які у порівнянні з ПЗЗ володіють деякими істотними перевагами, такими як низьке енергоспоживання та цифрова обробка безпосередньо у структурі матриці фотоприймачів.

Прилади із зарядним зв'язком (ПЗС) належать до класу твердотільних напівпровідникових фотоприймачів, першими з яких були фотодіоди, перше застосування яких – це вдала реєстрація явища сонячного затемнення, що спостерігалося берлінськими вченими в Єгипті в 1911 році. Відтоді пройшло чимало часу, фотодіоди удосконалювалися, але їх основний недолік – одновимірність, не дозволив їм знайти широкого застосування для реєстрації зображень. З кінця 30-х років серед приймачів плоских оптичних полів почали з'являтися телевізійні трубки, які до кінця 70-х були основним типом приймачів плосих зображень. Було розроблено багато приладів різних систем за типами: отікон, ізокони, секон, відикони, плюмбікон (у телевізійному мовленні – трубки зі зворотним пучком), кремнікон і суперкремнікони, диссектори – спеціалізовані трубки з підвищеною квантовою ефективністю. Всі вони мали серйозні недоліки: великі розміри, низьку квантову ефективність (на рівні 5 – 10%), малий динамічний діапазон тощо. Революційна зміна ситуації відбулося з появою твердотільних напівпровідникових приймачів нового покоління – вже названих ПЗЗ-структур. Їх квантова ефективність досягає 95 – 98 %, тобто кожен падаючий на прилад фотон реєструється системою з майже 100% імовірністю.

3.3.2. Віхи розвитку цифрових камер з ПЗЗ-матрицями

1969 рік. Дослідники з Bell Laboratories - Віллард Бойл (Willard Boyle) і Джордж Сміт (George Smith) сформулювали ідею приладу з зарядним зв'язком (ПЗС) для реєстрації зображень.

1970 рік. Вчені з Bell Labs створили прототип електронної відеокамери на основі ПЗЗ. Перший ПЗЗ містив лише сім чутливих елементів.

1972 рік. Компанія Texas Instruments запатентувала пристрій під назвою «Повністю електронний пристрій для запису і подальшого відтворення нерухомих зображень». В якості чутливого елемента в ньому використовувалася ПЗЗ-матриця, зображення зберігалися на магнітній стрічці, а відтворення відбувалося через телевізор. Даний патент практично повністю описував структуру цифрової камери, незважаючи на те, що сама камера фактично була аналоговою.

1973 рік. Компанія Fairchild (одна з легенд напівпровідникової індустрії) почала промисловий випуск ПЗЗ-матриць. Вони були чорно-білими і мали роздільну здатність всього 100x100 пікселів. У 1974 р. за допомогою такої ПЗЗ-матриці і телескопа була отримана перша астрономічна електронна фотографія. У тому ж році Гіл Амеліо (Gil Amelio), який також працював у Bell Labs, розробив технологічний процес виробництва ПЗЗ-матриць на стандартному напівпровідниковому обладнанні. Після цього їх поширення пішло значно швидше.

1975 рік. Інженер Стів Сассон (Steve J. Sasson) працівник компанії Kodak, зробив першу працюючу камеру на ПЗЗ-матриці виробництва Fairchild. Камера важила майже три кілограми і дозволяла записувати знімки розміром 100x100 пікселів на магнітну касету (один кадр записувався 23 секунди).

1976 рік. Fairchild випускає першу комерційну електронну камеру MV-101, яка була використана на конвеєрі Procter & Gamble для контролю якості продукції. Це вже була повністю цифрова камера, що передавала зображення в мінікомп’ютер DEC PDP-8 / E за спеціальним інтерфейсом.

1980 рік. Sony представила на ринок першу кольорову відеокамеру на основі ПЗЗ-матриці; до цього всі камери були чорно-білими.

1981 рік. Sony випускає камеру Mavica (скорочення від Magnetic Video Camera), якою і прийнято відраховувати історію сучасної цифрової фотографії. Mavica була повноцінною дзеркальною камерою зі змінними об'єктивами і мала роздільність 570 × 490 пікселів (0,28 Мп). Записувала окремі кадри у форматі NTSC, а тому називалася «статичною відеокамерою» (Still video camera). Отримані на ПЗЗ-матриці зображення зберігалися на спеціальному гнучкому магнітному диску в аналоговому відеоформаті NTSC. Диск був схожий на дискету, але з розмірами 2 дюйми. На нього можна було записати до 50 кадрів, а також звукові коментарі. Диск був перезаписуваний і називався Video Floppy і Mavipak.

1981 рік. Приблизно в той же час у канадському університеті Калгарі була розроблена перша повністю цифрова камера під назвою All-Sky camera. Вона

призначалася для наукової фотозйомки, була зроблена на основі ПЗЗ-матриці Fairchild і видавала дані в цифровому форматі.

1984-1986 р. р. За прикладом Sony, компанії Canon, Nikon, Pentax також почали випуск електронних відео- і фотокамер. Камери були аналоговими, коштували дуже дорого, мали роздільність 0,3-0,5 Мп. Зображення у форматі відеосигналу писалися на магнітні носії (як правило, дискети). У цьому ж році Kodak ввів в ужиток термін «мегапіксель», створивши промисловий зразок CCD-сенсора з роздільною здатністю 1,4 Мп.

1988 рік. Компанія Fuji, якій і належить право першості у виробництві повноцінної цифрової відео-фотокамери, разом з Toshiba випустила камеру Fuji DS-1P, заснованої на ПЗЗ-матриці з роздільною здатністю в 0,4 Мп. DS-1P стала першою камерою, яка записувала зображення у форматі NTSC не на магнітний диск, а на змінну карту пам'яті статичного ОЗП (Static RAM) з вбудованою батарейкою для підтримки цілісності даних. У тому ж році Apple спільно з Kodak випускає першу програму для обробки фотозображень на комп'ютері PhotoMac.

1990 рік. З'явилася цифрова комерційна камера - Dycam Model 1, більш відома як Logitech FotoMan FM-1. Камера була чорно-біла (256 градацій сірого), мала роздільність 376x240 пікселів і 1 мегабайт вбудованої оперативної пам'яті для зберігання 32 знімків, вбудований спалах і можливість підключення до комп'ютера.

1991 рік. Kodak, спільно з Nikon, випускає професійний дзеркальний цифровий фотоапарат Kodak DSC100 на основі камери Nikon F3. Запис відбувався на жорсткий диск, розташованого в окремому модулі, вага близько 5 кг.

1994 рік. Apple робить справжній маркетинговий прорив, випустивши Apple QuickTake 100. Фотокамера була розміщена в корпусі, що нагадує бінокль (популярна в ті роки форма для відео-фотокамер), дозволяла зберігати у внутрішній Flash-пам'яті вісім знімків розміром 640 × 480 (0,3 Мп) або тридцять два знімки з половинною роздільною здатністю (320 × 200). Підключалася камера до комп'ютера за допомогою послідовного порту, живлення від трьох батарейок формату AA і коштувала менше восьмисот доларів.

1994 рік. На ринку з'явилися перші Flash-карти форматів Compact Flash і SmartMedia, обсягом від 2 до 24 Мбайт.

1995 рік. Випущені перші любительські фотоапарати Apple QuickTake 150, Kodak DC40, Casio QV-11. Модель Sony Cyber-Shot – перша цифрова фотокамера з LCD-дисплеєм і першою з поворотним об'єктивом. Почалася гонка за зниження ціни і наближення якості цифрової фотографії до якості плівкової.

1996 рік. Прихід на ринок компанії Olympus, не тільки з новими моделями, але і з концепцією комплексного підходу до цифрового фото, заснованої на

створенні локальної користувальницької інфраструктури: камера + принтер + сканер + персональне сховище фотоінформації.

1996 рік. Fuji представила перший цифровий мінілаб. Технологія нового пристрою була гібридною: вона поєднала в собі лазерні, цифрові та хімічні процеси. Надалі, до виробництва цифрових мінілабів підключилися й інші компанії, зокрема, Noritsu і Konica.

1997 рік. Подолано символічний рубіж роздільної здатності в 1 мегапіксель. На початку року виходить камера FujiFilm DS-300 с 1,2-мегапіксельною матрицею та камера Olympus C-1400 XL (1,4 мегапікселя).

2003 рік. Початок випуску Canon EOS 300D – першої доступної за ціною широкому колу фотографів дзеркальної цифрової фотокамери зі змінними об'єктивами. Завдяки цьому, а також випуску аналогічних камер іншими виробниками, сталося масове витіснення плівкового принципу фотореєстрації не тільки із середовища невибагливих користувачів, а й серед «просунутого» контингенту любителів і професіоналів, ставлення яких до цифрової фотографії до того було досить прохолодним.

Список літератури

1. *Gerätekonstruktion* / Krause, W., et al. Bd. 1. Berlin: VEB Verlag Technik, 1982 – 348 s. (Наявний переклад)
2. *Gerätekonstruktion* / Krause, W., et al. Bd. 2. Berlin: VEB Verlag Technik, 1982 – 326 s. (Наявний переклад)
3. Northrop, R. B. *Introduction to Instrumentation and Measurements.* 3rd edition. CRC Press, 2014 – 952 p.
4. Единая система конструкторской документации: Основные положения. ДСТУ ГОСТ 2.101-68. *Виды изделий.* С. 34-37; ДСТУ ГОСТ 2.102-68. *Виды и комплектность конструкторских документов.* С. 38-49; ДСТУ ГОСТ 2.103-68. *Стадии разработки.* С. 50-52. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 343 с.
5. Dietrych, Janusz. *System i konstrukcija.* Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techneczntt, 1978. – 456 s. (Наявний переклад)
6. Кулагин В. В. *Основы конструирования оптических приборов.* – Л.: Машиностроение, 1982. – 312 с.
7. Житарюк В. Г. *Функціональні перетворення в приладах і апаратах* / Навчальний посібник. – Чернівці, "Рута", 2002. – 80 с.
8. Zhytaryuk, V. G. *Functional structure of devices and apparatus* (2018) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10612, стаття № 106120G.
9. Грейм И. А. *Элементы проектирования и расчет механических приборов.* – Л.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
10. ДСТУ ГОСТ 13377-75. *Надежность в технике.* Из-тво стандартов, 1975.
11. *Handbuch der industriellen Messtechnik.* 3 Auflage. Bd. 1. /Prof. Profos, P., Herausgeber. Bd. 1. Essen: Vulcan – Verlag, 1988. – 492 s. (Наявний переклад)
12. Patrabanis, D. *Sensors and Transducers.* Prentice-Hall of India Pvt. Ltd, 2004 – 344 p.
13. Webster, J. G. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook.* 1st edition. CRC Press, 1998 – 2630 p.
14. Елисеев С. В. *Геодезические инструменты и приборы.* – М.: Недра, 1983. – 320 с.
15. Horowitz, P., Hill, W. *The Art of Electronics.* 3rd edition. Cambridge University Press, 2015 – 1220 p.
16. Ryan, T. P. *Statistical Methods for Quality Improvement.* 3rd edition. Wiley, 2011 – 704 p.
17. Zhytaryuk, V.G., Kurek, E.I.. *Gram-Charlier distribution in statistical problems of optics* (2022) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 12126, стаття №121261B.
18. Damjanovski, Vlado. CCTV. Second Edition: Networking and Digital Technology (Bible CCTV). 2005. – 584 p. (Наявний переклад 1-го видання)

19. Фаранзе Н. Г., Илясов Л. В., Азим-Заде А. Ю. *Технологические измерения и приборы.* – М.: Высш. шк., 1989. – 456 с.
20. Bell, D. A. Electronic Instrumentation and Measurements. 2nd edition. Oxford University Press, 2007 – 451 p.
21. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА/Под ред. Э. Т. Романычевой. – М.: Радио и связь, 1989. – 448 с.
22. Костиков В. Г., Парфенов Е. М., Шахнов В. А. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 344 с.
23. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования/ Под ред. Р. Г. Варламова. – М.: Сов. Радио, 1980. – 480 с.
24. Парвулюсов Ю. Б., Солдатов В. П., Якушенков Ю. Г. Проектирование оптико-электронных приборов. – М.: Машиностроение, 1990. – 432 с.
25. Gupta, A. K. Reliability, *Maintenance and Safety Engineering*. Laxmi Publications, 2009 – 444 p.
26. Cordell, B. *Designing Audio Power Amplifiers*. 1st edition. McGraw-Hill/TAB Electronics, 2010 – 640 p.
27. Элементы приборных устройств. Курсовое проектирование / Под общ. ред. О. Ф. Тищенко. Учебное пособие для вузов. В 2 частях. – М.: Высш. шк., Ч.1. 1978. – 328 с., Ч.2. 1978. – 232 с.
28. Крайнев А. Ф. Словарь-справочник по механизмам. – М.: Машиностроение, 1987. – 560 с.
29. Расчет и конструирование механизмов и деталей приборов/ Под ред. Ф. Л. Литвина. – Л.: Машиностроение, 1975 – 200 с.
30. Mobley, K. Maintenance Engineering Handbook. 8th edition. McGraw Hill, 2014 – 704 p.
31. Тхоржевский В. П. Конструирование и изготовление приборов для стран с тропическим климатом. – М.: Машиностроение, 1985. – 248 с.
32. Blackburn, J. L., Domin, T. J. Protective Relaying: Principles and Applications. 4th edition, CRC Press, 2014 – 695 p.
33. Weston, D. Electromagnetic Compatibility. Principles and Applications. 2nd edition. CRC Press, 2001 – 856 p.
34. Петров В. П. *Контроль качества и испытание оптических приборов*. – Л.: Машиностроение, 1985. – 222 с.
35. Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. – Л.: Энергия, 1971. – 248 с.
36. Бабаев А. А. Амортизация, демпфирование и стабилизация бортовых оптических приборов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 232 с.
37. Zhytaryuk, V.G. Optical investigation of electrostructured undersurface layers of glass / Proc. of SPIE, Vol. 5477, 2004, P.272-275.

38. Лазарев Л. П. *Оптико-электронные приборы наведения.* – М.: Машиностроение, 1989. – 512 с.
39. Боднер В. А., Алферов А. В. Измерительные приборы: Теория измерительных приборов. Измерительные преобразователи. – М.: Изд. стандартов, !986. Т.1. – 392 с.
40. Браславский Д. А., Петров В. В. Точность измерительных устройств. – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.
41. Бруевич Н. Г. Точность механизмов. – М.: Гостехиздат, 1946. – 354 с.
42. Бруевич Н. Г. Сергеев В. И. *Основы нелинейной теории точности и надежности устройств*. – М.: Наука, 1976. – 136 с.
43. Иванцов А. И. *Основы теории точности измерительных устройств*. – М.: Изд. стандартов, 1972. – 212 с.
44. Коротков В. П. и др. *Основы метрологии и теория точности измерительных устройств*. – М.: Изд. стандартов, 1978. – 352 с.
45. Латыев С. М. *Конструирование точных (оптических) приборов*: Учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2007. – 579 с.
46. Zhytaryuk, V. G. *About the question for accuracy of devices and apparatus* (2020) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 11369, стаття № 1136914.
47. Мирошников М. М. *Теоретические основы оптико-электронных приборов*. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
48. *Справочник конструктора оптико-механических приборов*/ Под ред. В. А. Панова. – Л.: Машиностроение, 1980. –744 с.
49. Якушенков Ю. Г. *Теория и расчет оптико-электронных приборов*. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.
50. Jones, J. C. *Design methods*. 2nd edition. Van Nostrand Reinhold, 1992. – 474 p.
51. Norman, D. *The Design of Everyday Things.* Basic Books, 2013 – 368 p.
52. Baxter, M. Product Design: *A Practical Guide to Systematic Methods of New Product Development*. 1st edition. CRC Press, 1995 – 324 p.
53. Sanders, M. S. *Human Factors In Engineering and Design*. 7th edition. McGraw-Hill Education, 1993 – 704 p.
54. Шпара П. Е., Шпара И. П. *Техническая эстетика и основы художественного конструирования.* Киев: Вища школа, 1989. – 247 с.
55. Зинченко В. П., Мунипов В. М., Смолян Г. Л. *Эргономические основы организации труда*. – М.: Экономика, 1994. – 432 с.
56. McCauley, P. *Ergonomics. Foundational Principles, Applications, and Technologies*. 1st edition. CRC Press, 2012 – 356 p.
57. *Эргономическая биомеханика* / Аруин А. С., *Зациорский* В. М. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
58. *Основи біофізики і біомеханіки*: навч. посіб. / Л. І. Григор'єва, Ю. А. Томілін; Чорномор. держ. ун-т ім. Петра Могили. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра

Могили, 2011. – 297 с.
59. Zhytaryuk, V. G. *External geometric structure of devices* (2024) Proceedings of SPIE − The International Society for Optical Engineering, 12938, стаття № 129380J
60. Lesko, J. *Industrial Design: Materials and Manufacturing Guide*. 2nd edition. Wiley, 2007 – 256 p.
61. Farag, M. M. *Materials and process selection for engineering design. 3rd edition*. CRC Press, 2014 – 520 p.
62. Zhytaryuk, V. G. The dynamics of visual perception pictures of stroboscope / Proc. of SPIE, Vol. 9809 (SPIE, Bellingham, WA 2015) стаття № 980916.
63. Ельников Н. Т., Дитев А. Ф., Юрусов И. К. *Сборка и юстировка оптико-механических приборов*. – М.: Машиностроение, 1974. – 350 с.
64. Ефремов А. А., Законников В. П., Подобрянский. А. В. *Сборка приборов.* – М.: Высшая школа, 1978. – 296 с.
65. Сухопаров С. А. *Сборка и юстировка морских дальномеров*. – М.: Оборонгиз, 1961. – 180 с.
66. *Оптико-механические приборы* / С. В. Кулагин, А. С. Гоменюк, В. Н. Дикарев и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
67. Плотников В. С., Варфоломеев Д.И., Пустовалов В.Е. *Расчет и конструирование оптико-механических приборов.* – М.: Машиностроение, 1983. – 256 с.
68. Орлов И. С. *Основы конструирования.* В 2-х томах. – М.: Машиностроение, 1989. Т. 1 – 574 с.
69. Левитская О. Н., Левитский Н. И. Курс теории механизмов и машин. – М.: Высшая школа, 1985. – 279 с
70. EN 614-1:2006A1:2009(E), *Safety of machinery – Ergonomic design principles – Part 1: Terminology and general principles*. European Committee Standard, Brussels, 2009. – 25 p.
71. Folta J., Nový L. Dejiny prírodných vied v dátach. Chronologický prehľad. Smena, Bratislava, 1981 – 376 p.

Для нотаток

Наукове видання

Житарюк Віктор Григорович

ПРИЛАДОЗНАВСТВО

Проєкт і конструкція приладів

Монографія

Літературний редактор *О. В. Колодій*

Технічний редактор *У. М. Мельник*

Підписано до друку 06.06.2024. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Друк різографічний.
Ум.-друк. арк. 20,4. Обл.-вид. арк. 21,9. Зам. № Н-048.
Видавництво та друкарня Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича
58002, м.Чернівці, вул. Коцюбинського, 2
e-mail: ruta@chnu.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №891 від 08.04.2002 р.



ЧНУ РУТА

ISBN 978-966-423-861-5