

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

М. П. Благодарний, І. П. Внуков

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МЕХАТРОННИХ КОМПЛЕКСІВ

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2014

УДК 681.527.7(075.8)
ББК 32.965я73
Б68

Рецензенти: канд. техн. наук Ю. В. Паржин,
канд. техн. наук А. П. Плахтєєв

Благодарний, М. П.

Б68 Теоретичні основи експлуатації мехатронних комплексів [Текст] : навч. посіб. / М. П. Благодарний, І. П. Внуков. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2014. — 176 с.

ISBN 978-966-662-350-1

Розглянуто життєвий цикл мехатронних комплексів (систем) і основи організації їх експлуатації. Обґрунтовано показники надійності та готовності мехатронних систем. Наведено практичні рекомендації щодо організації експлуатації складових частин (приводів, датчиків, каналів передачі інформації й електронних засобів керування) мехатронних систем на виробництві, ремонту й зберігання. Проаналізовано шляхи отримання й використання інформації про технічний стан мехатронних систем і комплексів.

Для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва».

Іл. 41. Табл. 9. Бібліогр.: 29 назв

УДК 681.527.7(075.8)
ББК 32.965я73

© Благодарний М. П., Внуков І. П., 2014
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2014

ISBN 978-966-662-350-1

ВСТУП

Сучасний розвиток комп'ютерно-інтегрованих виробництв характеризується неперервним удосконаленням технічної оснащеності, упровадженням комп'ютерних технологій в оброблення матерії та інформації, використанннм енергії під час технологічних процесів [1–29]. Науково-технічний прогрес викликав появу нових технічних засобів для реалізації технологічних процесів, до яких належать і мехатронні системи й комплекси. Для підтримки вузлів мехатронних систем і комплексів у високому ступені готовності до застосування за призначенням обслуговому персоналу необхідно не лише досконало знати їх устрій, але й уміти організувати й провести їх експлуатацію на науковій основі [24–29].

Керівники структурних підрозділів виробництва й інженери, що вирішують питання експлуатації, повинні ясно уявляти, від яких умов і чинників залежить успішне виконання поставлених перед мехатронними системами завдань, уміти контролювати зміни умов експлуатації і технічного стану. Тільки строго наукова організація й проведення усього комплексу заходів, пов'язаних з експлуатацією мехатронних систем і комплексів, дають змогу вирішувати із заданою ефективністю завдання комп'ютерно-інтегрованих виробництв.

У посібнику з єдиних методологічних позицій викладено теоретичні основи організації експлуатації мехатронних систем і шляхи забезпечення високого ступеня їх готовності, розглянуто типові заходи, пов'язані з підготовкою вузлів мехатронних систем до застосування за призначенням, технічним обслуговуванням, ремонтом, зберіганням і транспортуванням, проаналізовано методи оцінювання впливу експлуатаційних характеристик виробів на показники якості експлуатації. Матеріал викладено з використанням апарату теорії ймовірностей і математичної статистики.

У додатках 1–4 наведено довідкові дані, необхідні для розрахунку надійнісних характеристик вузлів мехатронних систем: значення

ймовірностей появи подій $P_m = \frac{\alpha^m}{m!} e^{-\alpha}$ (розподіл Пуассона), функції

Лапласа, функції $y = e^{-x}$, значення інтенсивностей відмов елементів вузлів мехатронних систем.

Матеріал посібника підготував колектив авторів. Розділи 1–5 і загальне редагування посібника підготував до друку заслужений винахідник України доцент М. П. Благодарний, а розділи 6–11 – заслужений працівник освіти України професор І. П. Внуков.

1. МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ І КОМПЛЕКСИ

1.1. Основні положення й означення мехатроніки

Термін «Мехатроніка» («Mechatronics»), згідно з даними джерел [1, 2], вперше увів японський інженер Тецуро Морі 1969 року. Незважаючи на наявність стандартного визначення, мехатроніка сьогодні залишається досить спірним поняттям. Цю назву було утворено комбінацією слів «механіка» й «електроніка» [1–5]. Об'єднання цих понять означає інтеграцію знань у відповідних галузях науки й техніки, що дало змогу перейти на вищий рівень якості у створенні техніки нових поколінь і виробництві нових видів систем і устаткування.

Мехатроніка – термін для опису технологій, що виникли на стиці електротехніки, машинобудування й програмного забезпечення. Мехатроніка – це нова область інженерії, що об'єднує електротехніку, механіку, комп'ютерні й інформаційні технології [2, 5]. Мехатроніка дає змогу проектувати, розвивати й застосовувати «інтелектуальні» пристрої в суміжних міждисциплінарних областях науки й техніки.

Мехатронний об'єкт (рос. мехатронный объект; англ. mechatronic object) синтезується на синергетичному об'єднанні вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними й комп'ютерними компонентами, що забезпечують проектування і виробництво якісно нових модулів, систем, машин з інтелектуальним керуванням їхніми функціональними станами (у тому числі рухом).

Мехатронний об'єкт – це узагальнене поняття, що містить поняття мехатронної системи, агрегата, модуля або вузла [2].

Мехатронний модуль (рос. мехатронный модуль; англ. mechatronic module) – уніфікований мехатронний об'єкт, що має автономну документацію і який призначено зазвичай для реалізації рухів по одній координаті. При цьому мається на увазі мехатронний модуль руху [2].

Мехатронний вузол (рос. мехатронный узел; англ. mechatronic junction) принципово відрізняється від мехатронного модуля тим, що його не уніфіковано [2].

Мехатронний агрегат (рос. мехатронный агрегат; англ. mechatronic aggregate) складається з кількох модулів [2].

Мехатронна система (рос. мехатронная система; англ. mechatronic system) – це система, що складається з декількох агрегатів або агрегата і кількох окремих модулів, тобто з об'єктів однакових або різних нижчих рівнів.

1.2. Мехатронні системи

Складна система – це сукупність компонентів, певним чином зв'язаних між собою, які діють як одне ціле [2]. Мехатронна система цілком відповідає цьому означенню як сукупність механічних, електронних і керувальних компонентів, що утворюють синергетичну єдність. Мехатронна система – цільова сукупність агрегатів з упорядкованими зв'язками, що динамічно функціонують у часі й просторі та взаємодіють із середовищем як єдине ціле. Мехатроніка перебуває в стадії становлення, тому видається доцільним розглянути означення, що відображають суть предмета мехатроніки. Найпоширенішим графічним символом мехатроніки стали три перетинних кола (рис. 1.1).



Рис. 1.1. До означення суті мехатроніки

Загальне означення мехатроніки в широкому розумінні наведено в Російському державному освітньому стандарті: «*Мехатроніка* — це нова галузь науки й техніки, присвячена створенню й експлуатації машин і систем із комп'ютерним керуванням рухом, що базується на знаннях в галузі механіки, електроніки й мікропроцесорної техніки, інформатики й комп'ютерного керування рухом машин і агрегатів» [3].

У цьому означенні особливо підкреслено триєдину суть *мехатронних систем* (МС), в основу побудови яких закладено ідею глибокого взаємозв'язку механічних, електронних і комп'ютерних елементів. Таким чином, системна інтеграція трьох зазначених елементів є необхідною умовою мехатронної системи.

Розглянемо приклад схеми мехатронної системи в узагальненому вигляді. У більшості випадків (рис. 1.2) мехатронна система складатиметься з основної системи, датчиків, електронних блоків керування і виконавчих механізмів.

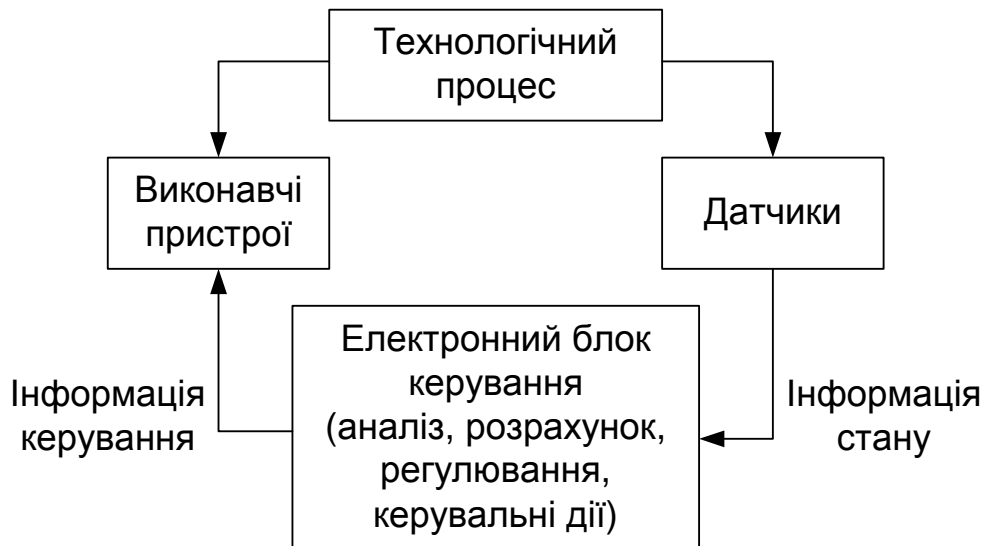


Рис. 1.2. Узагальнений приклад мехатронної системи

Отже, наявність трьох обов'язкових частин — механічної (електромеханічної, пневматичної, гідравлічної тощо), електронної і комп'ютерної, які зв'язані енергетичними й інформаційними потоками, є первинною характерною ознакою мехатронних систем. Електромеханічна частина містить механічні ланки передачі, робочий орган, електродвигуни, сенсори й додаткові електротехнічні елементи (гальма, муфти).

Механічний пристрій призначено для перетворення рухів ланок робочого органу машини на необхідний рух цього робочого органу. Електронна частина складається з мікроелектронних пристроїв, силових перетворювачів і вимірювальних засобів. Сенсори (або датчики) призначено для збору даних про фактичний стан зовнішнього середовища й об'єкта керування для наступного первинного оброблення й передання отриманої інформації до пристрою комп'ютерного керування (ПКК).

Програмні засоби мехатронних систем мають забезпечувати безпосередній перехід від задуму системи через її математичне моделювання до керування функціональним рухом у реальному часі.

Основними вимірюваними величинами, які використовуються в мехатронних системах, є такі [3 — 5] :

- електричні (напруга, струм, напруженість, опір, ємність, індуктивність, намагніченість);
- механічні (переміщення, кут, нахил, рівень, швидкість, частота

обертання, прискорення, сила, тиск, момент та ін.);

— термічні (температура);

— хімічні й фізичні (вологість, теплопровідність, рН-значення вміст пилю, вміст пари, інтенсивність випромінення, довжина хвилі, кольори, молекули газу, рідини, твердого тіла та ін.) [29].

Мехатронний підхід до створення машин із комп'ютерним керуванням застосовують частіше, ніж традиційні підходи до автоматизації, оскільки має такі переваги:

— відносно низька вартість завдяки високому ступеню інтеграції, уніфікації і стандартизації всіх елементів;

— висока якість реалізації складних і точних рухів унаслідок застосування методів інтелектуального керування;

— висока надійність, довговічність і завадозахищеність;

— конструктивна компактність модулів (аж до мініатюризації в мікромашинах);

— поліпшені масогабаритні й динамічні характеристики машин унаслідок спрощення кінематичних ланцюгів;

— можливість поєднання функціональних модулів у складні системи й комплекси під конкретні завдання замовника.

Таким чином, *мехатронна система* (МС) – це сукупність взаємозв'язаних і взаємодійних пристроїв, приладів та елементів, призначених для досягнення єдиної мети. Мехатронні системи складаються з датчиків, виконавчих пристроїв, засобів зберігання, приймання, передання, оброблення й подання інформації, які є функційно взаємозв'язаними.

Прикладами окремих мехатронних систем у складі комп'ютерно-інтегрованих виробництв (КІВ) є модулі оброблення, складання, робототехніки, транспортування продукції тощо [8, 10, 12]. Мехатронні системи можна об'єднувати в мехатронні комплекси.

1.3. Мехатронні комплекси

Мехатронний комплекс (МК) – ієрархічно організована сукупність мехатронних систем, обчислювальних та інших інформаційно пов'язаних і взаємодійних систем, що цілеспрямовано функціонують і забезпечують виконання в повному обсязі задач, пов'язаних з обслуговуванням певних об'єктів і технологічних процесів. Як приклад мехатронного комплексу розглянемо структуру КІВ (рис. 1.3).

Функції, що виконують КІВ, поділяються на інформаційні і виробничі. Інформація про процеси оброблення, складання, технічний стан елементів виробництва й результати технологічного процесу (виготовленої продукції) надходить до суміжних керувальних ланок, обслугового персоналу, підсистем сервісу, технологічної підготовки виробництва й т. ін.

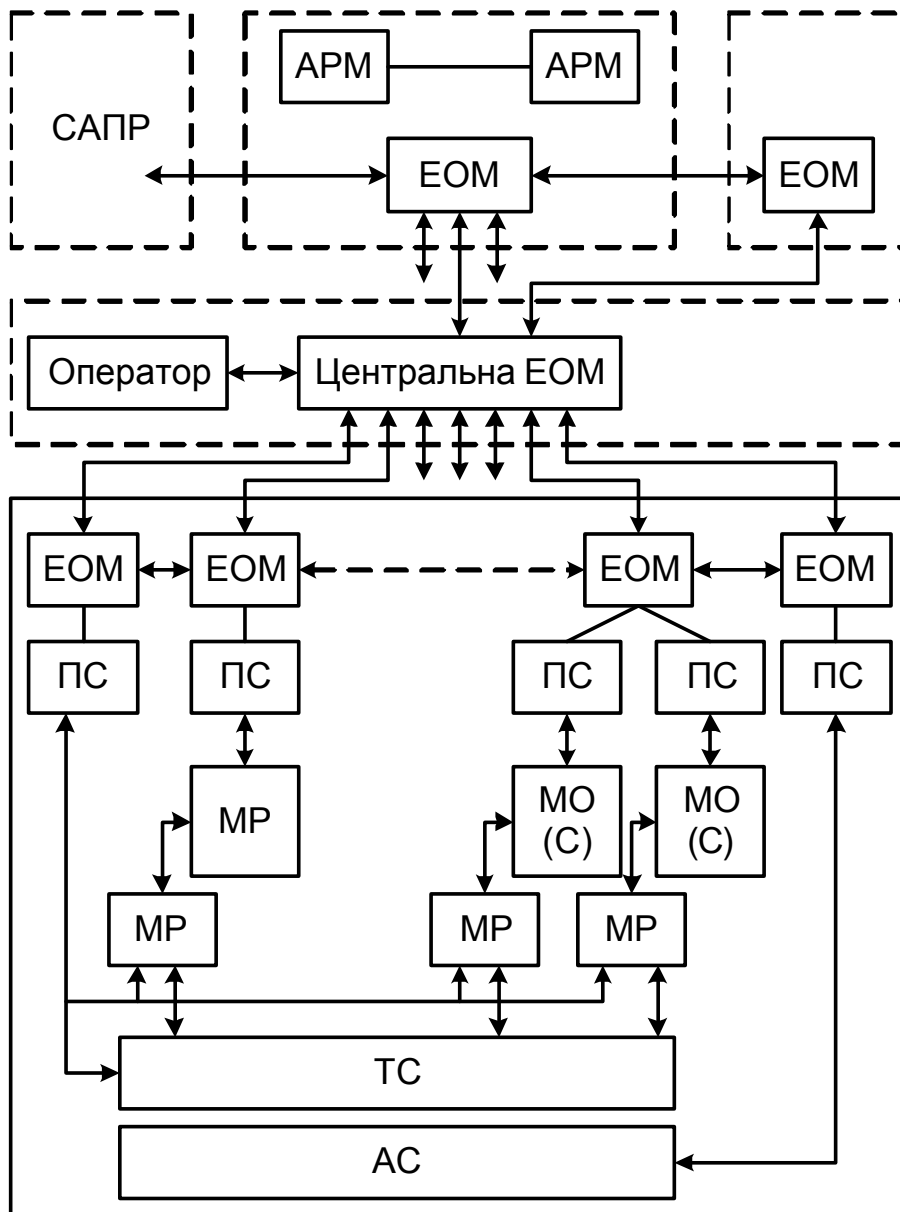


Рис. 1.3. Структура комп'ютерно-інтегрованого виробництва (мехатронного комплексу)

На основі отриманої інформації приймається рішення щодо подальшої роботи підсистем КІВ [6, 10, 12].

Як підсистема керування КІВ і робототехнічних систем використовується керувальний обчислювальний комплекс (КОК), який створюється зазвичай на базі комп'ютерів і містить засоби з'єднання з об'єктами керування, периферійні прилади, засоби передачі інформації.

Керувальний обчислювальний комплекс має ієрархічну структуру, що містить зазвичай три рівні, кожному з яких відповідає свій комплекс технічних засобів і вирішуваних завдань [10, 12, 28]. Керування роботою

КОК, обмін інформацією між рівнями і зв'язок із зовнішніми вищими рівнями забезпечується сукупністю обслуговувальних програм.

На першому рівні КОК здійснює керування окремими об'єктами виконавальної системи КІВ. До складу КОК належить мікро-ЕОМ, що керує модулями оброблення (складання) (відповідно МО і МС), модулями робототехніки (МР), транспортною системою (ТС) та автоматизованим складом (АС) через пристрої зв'язку з об'єктом (ПЗО).

На цьому рівні здійснюється зазвичай автоматичне внутрішньомодульне керування технологічними процесами з оптимізацією режимів, яке реалізується на базі мікро-ЕОМ і мікропроцесорних наборів (МПН).

На другому рівні виконуються завдання автоматизації організаційно-технологічного керування й синхронізації роботи МО, що реалізується на базі термінальних станцій оброблення інформації на основі центральної ЕОМ.

Третій рівень керування являє собою автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП), виробництвом (АСКВ) і систему автоматизованого проектування (САПР). Його призначено для автоматизації оперативно-виробничого керування стосовно задач тижневого й змінно-добового планування, технологічного проектування, обліку й сервісу. Міні-ЕОМ відповідних автоматизованих систем зв'язані з центральною ЕОМ другого рівня [10].

Нормальне функціонування засобів оброблення усіх рівнів КОК забезпечується завдяки обміну інформацією між з'єднаними комп'ютерами. Обмін інформацією між комп'ютерами й об'єктами, якими вони керують, є необхідною закономірністю функціонування КІВ.

Комп'ютерно-інтегроване виробництво в загальному випадку містить технологічне устаткування, засоби керування й зв'язку, перевірне устаткування, енергосистеми та інші механічні, електричні, електронні пристрої і засоби, які є взаємозв'язаними й утворюють певну цілісність і єдність.

Цей комплекс є автоматизованим. Для спрощення поділимо комп'ютерно-інтегроване виробництво на дві взаємозв'язані частини (рис. 1.4) [7, 28]: об'єкт контролю й керування (ОКК) і засоби контролю й керування (ЗКК).

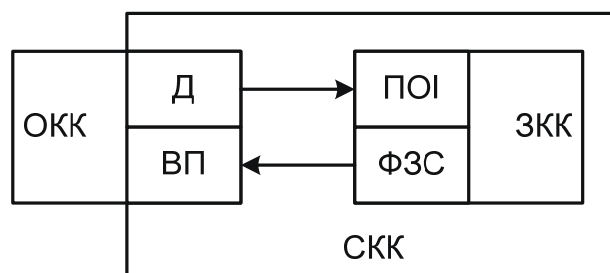
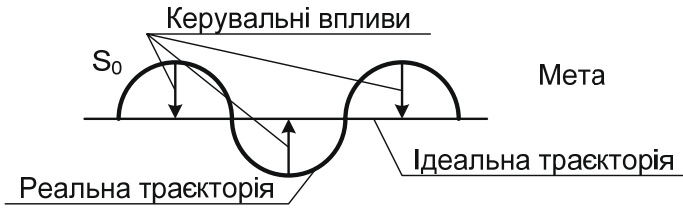
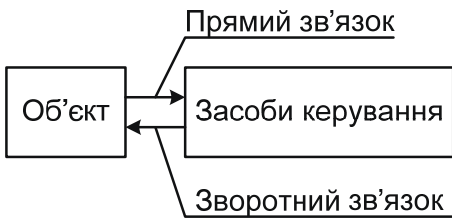


Рис. 1.4. Узагальнена схема КІВ

На об'єкті контролю й керування поміж систем, підсистем, вузлів і пристроїв виділимо датчики (Д) і виконавчі пристрої (ВП).

Датчики, виконавчі пристрої, засоби контролю й керування, допоміжні пристрої, що зв'язують їх у єдине ціле, утворюють систему контролю й керування. Об'єкт контролю й керування характеризується своїм станом, який можна визначити датчиками (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Загальні закони керування	Зміст загальних законів керування
Усяке керування є цілеспрямованим процесом	
Усяке керування є інформаційним процесом	<p>Зберігання бажаних станів (ідеальної траєкторії) Збір і передача інформації про поточний стан об'єкта. Оцінювання поточного стану: порівняння поточного стану з бажаним Вироблення (формування) керувального впливу Передача керувального впливу Виконання керувального впливу</p>
Усяке керування здійснюється в замкнутому контурі	<p>Середовище</p> 

Повідомлення про стан об'єкта надходять до засобів контролю й керування, де оброблюються пристроєм оброблення інформації (**ПОІ**) відповідно до заданого закону. Засоби контролю й керування формують зворотний сигнал (керувальний або стимулювальний), який з допомогою формувача зворотних сигналів (ФЗС) передається на об'єкт контролю й керування. Далі більш детально буде розглянуто поняття «керування» і пов'язані з ним «закон керування», «алгоритм керування» та ін.

Об'єкт функціонує в зовнішньому середовищі, прямуючи до досягнення мети (або заданого стану). Завади зовнішнього середовища протидіють

досягненню заданої мети (або заданого стану). Тому засоби керування мають компенсувати вплив середовища.

Керування — це цілеспрямований вплив на об'єкт керування, який компенсує вплив зовнішнього середовища і приводить його до необхідного стану (або заданої мети).

Цілеспрямований вплив на об'єкт керування можна здійснити у таких випадках:

- а) зібрано відомості про поточний стан об'єкта;
- б) проведено порівняльне оцінювання поточного й бажаного (що відповідає меті) станів;
- в) сформовано керувальний вплив;
- г) передано керувальний вплив;
- д) прийнято й виконано керувальний вплив.

Пункти *а)* і *д)* можна виконати, якщо об'єкт і засоби керування являють собою замкнутий контур. Таким чином, керування об'єктом є цілеспрямованим інформаційним процесом у замкнутому контурі (об'єкт — засоби керування) з усунення впливу зовнішнього середовища.

З огляду на принцип причинності кожному зовнішньому впливу (дії) на об'єкт має відповідати певна реакція засобів керування (керувальна дія). Конкретна керувальна дія формується за законами керування певним об'єктом. Закон керування — це конкретне правило формування керувальної дії (сигналу) на основі відомих станів заданого об'єкта. Алгоритм керування — це кінцевий набір формалізованих правил формування керувальних дій.

Поняття «закон керування» і «алгоритм керування» змістовно є дуже схожими. Будь-який алгоритм (на відміну від закону) має характерні особливості:

- *масовість* — можливість розв'язання однотипних задач на заданій множині вхідних даних;
- *детермінованість* — розкладення розрахунків на елементарні операції зазвичай дискретного характеру;
- *результативність* — однозначна відповідність отримуваних результатів вхідним даним.

Цілей керування можна досягти за наявності вірогідних вихідних і поточних даних про стан об'єкта керування. Ці відомості можна отримати під час контролю об'єкта. Якщо в системі здійснюються процеси контролю й керування, то таку систему називають системою контролю й керування. Зі змісту понять «керування», «контроль», «дія», «алгоритм» та інших випливає, що кожна система, яка реально існує, містить [5]:

- матеріали, з яких побудовано систему;
- енергію для отримання й оброблення відомостей, формування й виконання керувальних (стимулювальних) дій;
- відомості про стан об'єкта, закони й алгоритми керування й контролю, норми (допуски, установлені вимоги).

Поняття «матеріал» («речовина»), «енергія» є широко відомими. Унаслідок існування законів збереження речовини й енергії поняття «речовина» й «енергія» пов'язують разом усі явища природи.

Відомості, повідомлення, інформація дають можливість з єдиного погляду розглядати процеси взаємодії об'єктів і засобів різної фізичної природи й різного призначення.

Інформація — одна із властивостей предметів, явищ, об'єктів, систем, процесів об'єктивної дійсності, що містить усі відомості про неї, які можна зберігати, передавати, приймати й перетворювати. Під інформацією розуміють не самі предмети, явища, об'єкти, системи, процеси, а відомості про них у вигляді чисел, формул, описів, креслень, символів, образів, тексту, мовлення, показань приладів, стимулювальних дій, команд керування (керувальних дій) і т. ін. Наприклад, інформація — це зміст книги, підручника, картини; найрізноманітніші стани об'єкта контролю й керування. Далі внутрішню інформацію про об'єкт будемо називати інформацією джерела (ІД).

Обсяги світового виробництва мехатронних пристроїв щорічно збільшуються, охоплюючи все нові сфери. Сьогодні мехатронні модулі й системи набули широкого застосування в усіх галузях, і особливо в машинобудуванні. Можна виділити такі тенденції розвитку й ключові вимоги світового ринку [4]:

- необхідність випуску й обслуговування устаткування відповідно до вимог міжнародної системи стандартів якості (сформульованих у стандартах ISO 9000, ISO 9001);

- інтернаціоналізація ринку науково-технічної продукції і, як наслідок, необхідність активного впровадження в практику форм і методів міжнародного інжинірингу і трансферу технологій;

- посилення в економіці значення малих і середніх виробничих підприємств завдяки їх здатності до швидкого й гнучкого реагування на мінливі вимоги ринку;

- бурхливий розвиток комп'ютерних систем і технологій, засобів телекомунікації (прямим наслідком цієї загальної тенденції є інтелектуалізація систем керування механічним рухом і технологічними функціями сучасних машин).

1.4. Рівні інтеграції мехатронних систем

За основну класифікаційну ознаку мехатроніки можна взяти рівень інтеграції складових елементів. Відповідно до цієї ознаки можна поділяти мехатронні системи за рівнями або поколіннями, якщо розглядати їх появу на ринку наукомісткої продукції в історичному контексті [4].

Мехатронними модулями називають складові мехатронної системи [4, 5]. Такі модулі можуть поєднувати в одному корпусі кілька компонентів, наприклад, привід (двигун), редуктор і датчики (рис. 1.5).

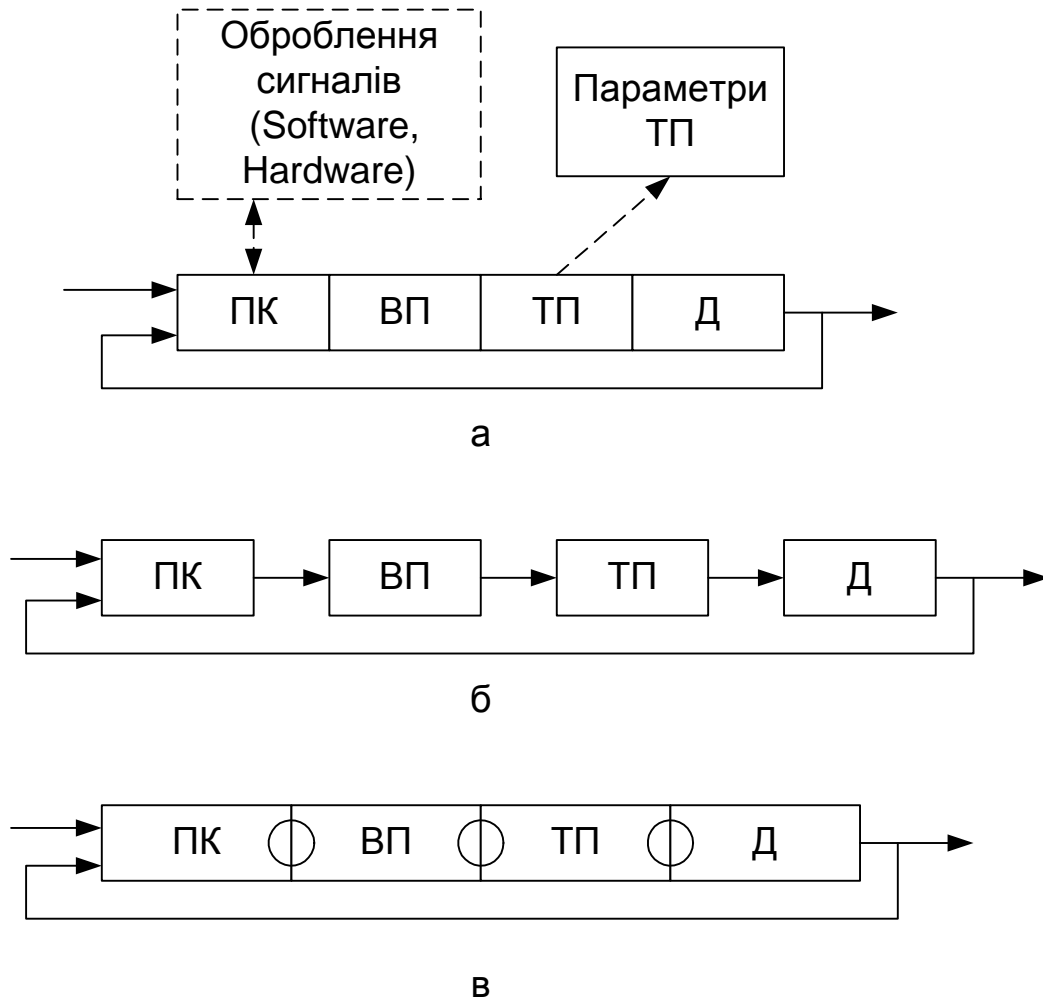


Рис. 1.5. Рівні інтеграції мехатронних систем [4]: ПК — пристрій керування; ВП — виконавчий пристрій; ТП — технологічний процес (об'єкт контролю й керування); Д — датчики; Software — програмне забезпечення; Hardware — апаратні засоби, О – можливість інтегрування вузлів мехатронної системи

Мехатронні модулі першого рівня являють собою об'єднання тільки двох вихідних елементів. Типовим прикладом модуля першого покоління може бути мотор-редуктор, де механічний редуктор і керований двигун виготовляють як єдиний функціональний елемент.

Мехатронні системи на основі цих модулів широко застосовують при створенні різних засобів комплексної автоматизації виробництва (конвеєрів, транспортерів, поворотних столів, допоміжних маніпуляторів тощо) [4, 5].

Мехатронні модулі другого рівня виникли в 1980-х роках унаслідок розвитку нових електронних технологій, які дали змогу утворити мініатюрні датчики й електронні блоки оброблення їхніх сигналів [32].

Об'єднання приводних модулів із зазначеними елементами привело до створення мехатронних модулів руху, склад яких повністю відповідає наведеному вище визначенню, коли досягнуто інтеграції пристроїв різної фізичної природи: механічних, електротехнічних і електронних. На базі мехатронних модулів цього класу створено керовані енергетичні машини (турбіни й генератори), верстати й промислові роботи із числовим програмним керуванням.

Розвиток мехатронних систем третього покоління обумовлено появою на ринку порівняно недорогих мікропроцесорів і мікроконтролерів. Його спрямовано на інтелектуалізацію всіх процесів, що мають місце у мехатронній системі, насамперед процесу керування функціональними рухами машин і агрегатів.

Водночас триває розроблення нових принципів і технологій виготовлення високоточних і компактних механічних вузлів, а також нових типів електродвигунів (високомоментних, безколекторних і лінійних), датчиків зворотного зв'язку й інформації.

Синтез нових прецизійних, інформаційних і вимірювальних наукомістких технологій дає основу для проектування й виготовлення інтелектуальних мехатронних модулів і систем.

На початку XXI ст. мехатронні машини й системи поєднано в мехатронні комплекси, що дало змогу збільшити конкурентоспроможність і забезпечити високу якість вироблюваної продукції [4, 5].

Контрольні запитання

1. Що називають мехатронікою?
2. Назвіть основні вузли мехатронної системи.
3. Які вимірювальні величини використовуються в мехатронних системах?
4. У чому полягає перевага мехатронного підходу?
5. Якими є основні рівні інтеграції мехатронних систем?
6. Дайте означення термінів «закон керування» і «алгоритм керування»
7. Назвіть склад узагальненої схеми КІВ.
8. Обґрунтуйте призначення приводів у складі мехатронних систем.
9. Обґрунтуйте призначення датчиків у складі мехатронних систем.
10. Назвіть класифікаційну ознаку мехатроніки.
11. Які чинники обумовлюють розвиток мехатронних систем третього покоління?
12. Дайте означення мехатронного комплексу.

2. ВУЗЛИ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

2.1. Виконавчі пристрої

Виконавчий пристрій (рос. – исполнительное устройство; англ. – execution unit) – складова частина (елемент) мехатронної системи, що здійснює перетворення інформаційного сигналу на механічні, теплові або електричні зміни стану мехатронних керованих елементів.

Виконавчі пристрої мехатронних систем (рис. 2.1) являють собою електричні машини, електромагнітні приводи, апарати запалювання, гідравлічні й пневматичні приводи, нагрівальні пристрої тощо [1, 2].



Рис. 2.1. Виконавчі механізми в мехатронній системі

Виконавчі механізми (кінцеві елементи керування) формують зв'язок між електричним сигналом процесора й реальним впливом (органи

регулювання) і перетворюють малопотужні сигнали, що передають інформацію до виконачих пристроїв (приводів), на робочі сигнали енергетичного рівня для здійснення процесу контролю й керування.

Конвертори сигналу об'єднано з елементами підсилювача для того, щоб використати фізичні принципи перетворення, які керують взаємозв'язком між різними формами енергії (електричною, механічною, рідинною, тепловою тощо) [1].

Виконавчі механізми зазвичай класифікують за такими ознаками [4, 5]:

- *за типом перетворення енергії* (енергія, що надходить від джерела, перетворюється на енергію магнітного чи електричного поля або на тепло); наприклад [3], автомобільні виконавчі механізми являють собою здебільшого електромагнітні механізми у вигляді електродвигунів, а також поворотні соленоїди (електромагніти), винятком є піротехнічна система надування подушки безпеки; соленоїдні виконавчі механізми можуть бути самостійними сервоелементами або виконувати керувальні функції, спрямовуючи роботу силового пристрою (наприклад, гідромеханічного);

- *за видом електричного струму* (постійний або змінний);

- *за швидкістю* (надшвидкодійні, швидкодійні, уповільнені, нормальні);

- *за габаритами й масою* (малогабаритні, мініатюрні, надмініатюрні);

- *за потужністю* (великої або нормальної потужності, малопотужні).

До виконавчих механізмів мехатронних систем належать пропорційні й дискретні приводи, керовані розподільники й насоси, пропорційні клапани, регулятори та пристрої, здатні відповідно до сигналів електронного блока керування дозовано перетворювати один вид енергії на інший [1–6].

2.1.1. Електричні приводи

Принцип дії електричного приводу базується на перетворенні електричної енергії на механічну [5]. Електричний привід на базі асинхронних двигунів, двигунів постійного струму або крокових двигунів широко застосовується в мехатронних системах вантажністю до 35 кг.

В асинхронних двигунах допускається ступінчасте регулювання частоти обертання шляхом змінення кількості підімкнених пар полюсів або пропорційне регулювання шляхом змінення частоти напруги змінного керованого струму.

У двигунах постійного струму частота обертання регулюється амплітудою підведеної напруги. У крокових електродвигунах з частотно-імпульсною системою керування частота обертання визначається частотою керувальних імпульсів, а кут повороту — їх кількістю.

До переваг електричних приводів належать високі значення ККД, використання одного виду енергії в керувальній і силовій частинах, безшумність в роботі, екологічна чистота.

Основні недоліки цього типу виконавчих пристроїв обумовлені способом перетворення електричної енергії на механічну. Це перетворення здійснюється з допомогою електромагнітного поля, що призводить до зменшення жорсткості й збільшення інерційності приводу. Унаслідок цього частота реверсу електроприводів зазвичай не перевищує 70 Гц і для них характерними є низькі динамічні характеристики [15]. Наявність силових електричних обмоток і колекторне підведення енергії роблять привід пожаро- і вибухонебезпечним, що обмежує його застосування у деяких хімічних виробництвах, під час виконання фарбувальних робіт, обслуговування окремих видів складських приміщень та інших технологічних процесів.

Чутливість електродвигунів до зовнішніх електромагнітних полів зменшує надійність електроприводів. Електричні приводи характеризуються низькими масогабаритними показниками. Питома потужність приводів з асинхронними електродвигунами досягає 100 Вт/кг, а з двигунами постійного струму — 40 Вт/кг.

Перспективні високомоментні електродвигуни дають змогу довести цей показник до 150 Вт/кг [15]. Роздільна здатність електричних приводів становить одиниці кутових хвилин і десяті долі міліметра. Їм притаманний вузький діапазон регулювання швидкості, складність отримання лінійних переміщень і вузький температурний діапазон.

Потужність електричних слідувальних приводів зазвичай не перевищує 2 кВт. Існують розробки електродвигунів з печатним і гладким ротором, безредукторних електродвигунів, а також безконтактних електродвигунів, що не іскрять, і дають змогу частково усунути недоліки електроприводу.

2.1.2. Пневматичні приводи

Незважаючи на поширеність пневматичних приводів (ПП) в мехатронних системах, з їх допомогою можна вирішувати тільки дуже вузьке коло технологічних завдань [4, 5]. ПП застосовують в основному тільки в циклових вузькоспеціалізованих системах керування, які не часто перепрограмовують. У циклових системах точність позиціонування може досягати десятих часток міліметра.

Для забезпечення повільного гальмування приводу при підході до заданої позиції або торцевої кришки зазвичай застосовуються пневматичні або замкнуті гідравлічні гальмівні пристрої [5]. ПП притаманні дуже висока швидкість переміщення і легкість отримання лінійних і кутових переміщень.

Вантажність пневматичних приводів зазвичай не перевищує 20 кг. Висока стисливість повітря як робочого тіла не дає змоги будувати точні пневматичні приводи з вантажністю понад 10 кг.

Для будування малопотужних стежних ПП зазвичай використовують широкоімпульсне керування у поєднанні з швидкодійними двопозиційними електропневматичними клапанами в каналах керування пневмоцилиндра. Точність позиціонування в таких приводах при робочому тиску до 0,8 МПа не перевищує декількох міліметрів. ПП належать до категорії екологічно чистих приводів і за відсутності маслорозпилювача у блоці підготовки повітря широко використовуються в екологічно чистих мехатронних системах. *Недоліки пневматичних виконавчих механізмів:* необхідність додаткового підведення стисненого повітря, великі габарити, обмежена точність позиціонування.

2.1.3. Гідравлічні приводи

Гідравлічні виконавчі пристрої (ГВП) використовують у мехатронних системах, вантажність яких перевищує 35 кг [5]. Питома потужність ГВП досягає 200 Вт/кг і більше. З їх допомогою забезпечується висока швидкодія, швидкість лінійних переміщень 1,5—2 м/с і кутових — 6,3—8 рад/с. Частота реверсу досягає 200 Гц. Мала стисливість рідини в них забезпечує високу жорсткість.

Значення ККД гідравлічних приводів залежить від застосованого способу дозування рідини, тому може коливатися від 0,9 при машинному або об'ємному способі й до 0,18 при дросельному способі регулювання швидкості з послідовним увімкненням дроселя. Проте, зважаючи на високу вартість регульованих об'ємних гідромашин, слідкувальні електрогідравлічні приводи з машинним регулюванням швидкості є економічно виправданими тільки при потужності понад 5 кВт.

Істотною перевагою застосування гідравлічних приводів є легкість отримання лінійних і кутових переміщень. Завдяки компактності, високій питомій потужності й пожегобезпечності електрогідравлічних приводів їх можна розташовувати безпосередньо на кінематичних ланках засобів автоматизації, спрощуючи конструкцію, підвищуючи точність і продуктивність шляхом вилучення додаткових кінематичних передач. Дискретність позиціонування досягає 0,1 мм або $4 \cdot 10^{-3}$ рад., потужність — 7 кВт. При використанні індустріальних мастил температурний діапазон становить від -20 до $+60$ °С, а при застосуванні синтетичних рідин може розширюватися і становити від -60 до $+200$ °С.

Головними недоліками ГВП є наявність, принаймні, двох видів енергії, що обумовлює необхідність установаження в об'єкті автоматизації громіздкої насосної станції; можливість витікання рідини в робочу зону;

необхідність попереднього прогрівання рідини, що зменшує продуктивність устаткування; великий рівень шуму функціонування приводу. При дросельному способі дозування також доводиться застосовувати спеціальні заходи для охолодження робочої рідини під час експлуатації. ГВП характеризуються складністю конструкцій і низькою технологічністю.

2.1.4. П'єзоелектричні приводи

Останнім часом в мехатронних системах широко застосовуються виконавчі пристрої, побудовані на базі п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) [4, 5]. У цьому класі виконавчих пристроїв як електромеханічний перетворювач використовується п'єзоелектрична кераміка, що здатна деформуватися при зміні підведеного електричного потенціалу (режим зворотного п'єзоефекту), а також генерувати на своїх поверхнях електричний потенціал при деформації зовнішньою силою (режим прямого п'єзоефекту) [27]. На відміну від традиційних електромагнітних перетворювачів, основою роботи яких є змінення електромагнітного поля, у ПЕП використовується електричне поле, що значно підвищує надійність і заводозахищеність виконавчих пристроїв в умовах зовнішніх збурювальних електромагнітних полів.

Сучасний склад п'єзоелектричної кераміки відрізняється високим ККД, високою механічною міцністю, здатністю працювати в діапазоні температур $-273...+350$ °С, а ПЕП на основі кобальту — до $+700$ °С, інертністю до агресивних середовищ, нечутливістю до електромагнітних і радіаційних полів.

У виконавчих пристроях на базі п'єзоелектричної кераміки масогабаритні показники порівняно з традиційним електроприводом зменшено в $1,5...100,0$ разів, досягнуто високих динамічних і навантажувальних характеристик.

2.1.5. Електромагнітні приводи

Принцип роботи електромагнітних приводів базується на взаємному притяганні м'яких феромагнетиків у магнітному полі [4]. Їх оснащують тільки однією котушкою, яка створює поле й споживає енергію, що йде на перетворення. Для підвищення індуктивності котушку оснащено залізним осердям.

Оскільки пристрій працює тільки в одному напрямку, потрібен зворотний елемент (пружина або магніт). Прикладами електромагнітних виконавчих механізмів є форсунки з електромагнітним керуванням для подання палива.

Основними перевагами електромагнітних приводів є проста, компактна й дешева конструкція, висока динаміка. Недоліками є нелінійна характеристика, мала навантажувальна здатність, тертя й магнітний гістерезис, відносно малі сили, а також великий струм стану спокою.

Принцип роботи електродинамічних приводів базується на силі, яка діє на рухомий заряд або провідник зі струмом у магнітному полі (сила Лоренца). Котушка або постійний магніт генерують постійне магнітне поле. Електрична енергія, призначена для одержання сили, прикладається до рухомої обмотки ротора (плунжера або імерсійної котушки).

Висока точність виконавчого механізму досягається особливістю конструкції обмотки ротора, що має малі масу й індуктивність. Два акумуляційних елементи (один на закріпленому, інший на рухомому компоненті) виробляють сили, що діють у двох напрямках шляхом реверсування струму в обмотках якоря [4].

2.1.6. Перспективні виконавчі пристрої

Сьогодні збільшується різноманітність виконавчих пристроїв [1–6]. Розглянуті у попередніх розділах виконавчі пристрої набули найбільшого поширення. Однак розробляються й знаходять своє застосування нові види виконавчих механізмів [4]: такі, що базуються на магнітострикційному ефекті, у яких використовуються реологічні, термобіметалічні, електрохімічні властивості, сплави з пам'яттю, з ефектом пам'яті (форми) тощо.

2.2. Засоби контролю технологічних процесів

Для контролю технологічних процесів у сучасних мехатронних системах необхідно оперативно визначати багато параметрів, а саме *температуру, тиск, хімічний склад, вологість, радіоактивність, лінійні й кутові розміри, швидкості (прискорення)* тощо. Для визначення параметрів технологічних процесів використовують датчики [1– 6, 28].

Датчик – це пристрій, що приймає зовнішні дії та реагує на них зміненням електричних сигналів. Під зовнішньою дією розуміють кількісну характеристику об'єкта контролю й керування, його властивість або якість, які необхідно прийняти й перетворити на електричний сигнал.

Призначення датчиків – реакція на певну зовнішню фізичну дію та перетворення її на електричний сигнал, сумісний із сигналами у схемах систем контролю й керування. Таким чином датчик – це перетворювач фізичної величини (часто неелектричної) на електричний сигнал.

Вихідними сигналами датчиків є напруга, струм, заряд, які описуються амплітудою, частотою, фазою або цифровим кодом. Цей набір характеристик називають форматом вихідного сигналу.

Таким чином, кожен датчик характеризується набором вхідних параметрів (будь-якої фізичної природи) і вихідних електричних параметрів.

Будь-який датчик є перетворювачем енергії. Незалежно від типу вимірюваної величини завжди передається енергія від досліджуваного об'єкта до датчика. Робота датчика – це особливий випадок передання інформації, а будь-яке передання інформації пов'язане з перетворенням енергії.

Поняття «датчик» необхідно відрізнити від поняття «перетворювач». Перетворювач конвертує один тип енергії на інший, тоді як датчик перетворює будь-який тип енергії зовнішньої дії на електричний сигнал.

Перетворювачі можуть виконувати також функції приводів, бути частиною складених датчиків (рис. 2.2).

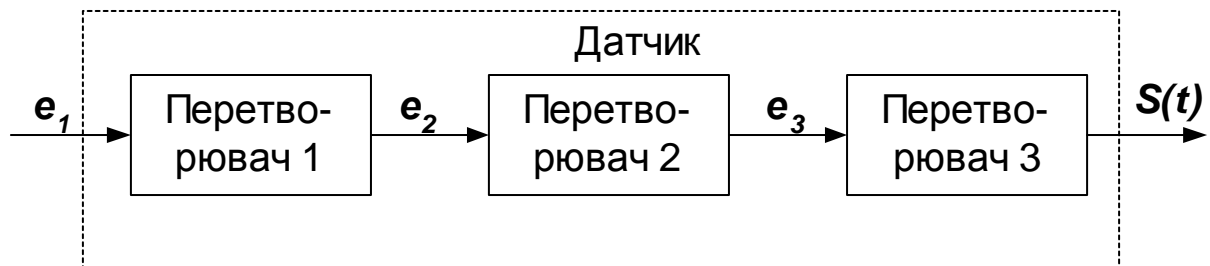


Рис. 2.2. Узагальнена структура датчика

До структури складених датчиків зазвичай входить щонайменше один датчик прямої дії і декілька перетворювачів.

Датчиками прямої дії називають датчики, які побудовано на фізичних явищах, що дають змогу проводити безпосереднє перетворення енергії зовнішньої дії на електричні сигнали. Прикладами таких фізичних явищ є фотоэффект, ефекти Холла і Зеєбека [6]. Датчики прямої дії перетворюють зовнішню дію безпосередньо на електричний сигнал, використовуючи для цього відповідне фізичне явище, тоді як складені датчики, перш ніж отримати електричний сигнал на виході кінцевого датчика прямої дії, здійснюють декілька перетворень енергії.

Наведемо узагальнену класифікацію датчиків [27, 28]. За наявності додаткового джерела енергії всі датчики можна поділити на *пасивні й активні, датчики прямої дії і складені датчики*. Прикладами активних датчиків є термістори і резистивні тензодатчики [3].

Основними характеристиками датчиків є чутливість, швидкодія, вартість, лінійність, перевантажувальна здатність, стабільність, наявність

гістерезису, габаритні розміри, вибірковість, розрізнявальна здатність, точність, ресурс, вага, наявність мертвої зони, формат вихідного сигналу.

Матеріалами для будування датчиків є тверді тіла (провідники, напівпровідники, діелектрики), рідини, гази, плазма, біологічні тканини. Найбільш поширеними засобами детектування є фізичні (електричні, магнітні та електромагнітні хвилі), тепло й температура, механічні хвилі й переміщення, радіоактивне проміння, хімічні та біологічні

Найбільш поширеними механізмами перетворень сигналів є фізичні (термо- і фотоелектрика, електромагнетизм, термо-, фото- й електропружність, термооптика, хімічні (хімічні перетворення, фізичні перетворення, електрохімічні процеси, електроскопія) та біологічні (біохімічні перетворення, фізичні перетворення, спектроскопія). На датчики діють наступні зовнішні впливи: акустичні (амплітуда, фаза, поляризація хвилі, спектр і швидкість), електричні (заряд, струм, потенціал, напруга, електричне поле, провідність, діелектрична проникність), магнітні (магнітне поле, магнітна проникність, магнітний потік), механічні (розташування, сила, прискорення, тиск, деформація, маса, щільність, рух, момент, швидкість потоку, втрата маси, форма, жорсткість, піддатливість, орієнтація), *оптичні* (амплітуда, фаза, поляризація хвилі, спектр і швидкість, коефіцієнт відбиття, відбивна здатність, поглинання), *теплові* (температура, потік, тепло, теплопровідність), хімічні (ідентичність, концентрація, стан), біологічні (біомаса, вид, концентрація, стан); проміння (тип, енергія, інтенсивність, потужність)

Датчики не працюють самі по собі, а входять до складу систем контролю й керування. У цих системах датчики можуть бути як зовнішніми, так і вбудованими. Їх розташовують на входах вимірювальних приладів для реагування на зовнішні дії та інформування системи про зміни в навколишньому середовищі.

Пасивний датчик не потребує додаткового джерела енергії. Як реакція на змінення зовнішньої дії на його виході завжди виникає електричний сигнал. Це означає, що такий датчик перетворює енергію зовнішнього сигналу на вихідний сигнал. Прикладами пасивних датчиків є термомпари, фотодіоди й п'єзоелектричні чутливі елементи.

Активні датчики для своєї роботи потребують зовнішньої енергії, що має назву сигналу збудження. При формуванні вихідного сигналу активний датчик так чи інакше впливає на сигнал збудження.

Оскільки такі датчики змінюють свої характеристики, їх іноді називають параметричними. Певні параметри активних датчиків модулюють сигнали збудження, і ця модуляція містить інформацію про значення вимірюваної величини.

Активні датчики розміщують усередині складних систем (систем контролю й керування) з метою моніторингу умов їх функціонування. Датчики є невід'ємною частиною систем контролю технологічних процесів.

На рис. 2.3 показано блок-схему системи контролю й керування, що складається із системи збору даних і керувального пристрою (комп'ютера).

Суб'єктами контролю можуть бути як матеріальні об'єкти, так і технологічні процеси. Інформацію щодо стану контролюваного об'єкта (технологічного процесу) збирають датчики, частину з яких (2, 3 і 4) розташовано на поверхні або усередині об'єкта контролю й керування. Датчик 1 не має безпосереднього зв'язку з об'єктом, тобто є безконтактним. Датчик 5 може виконувати різні функції, наприклад контролювати умови всередині самої системи. Датчики 1 і 3 не можна безпосередньо приєднати до стандартних електронних схем через невідповідність форматів вихідних сигналів.

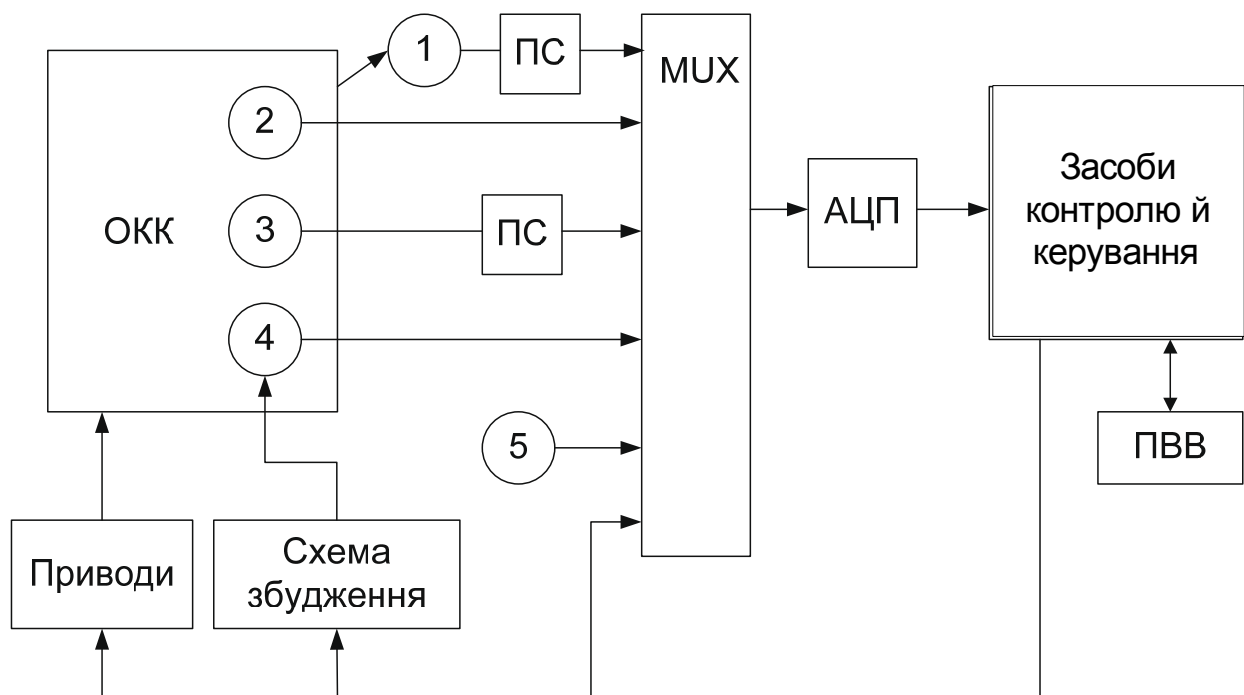


Рис. 2.3. Приклад мехатронної системи

Для їх підімкнення необхідні спеціальні інтерфейсні пристрої (пристрої спряження) — перетворювачі сигналів. Датчики 1, 2, 3 і 5 є пасивними, оскільки для формування вихідних сигналів їм не потрібно додаткової електричної енергії. Датчик 4 є активним, для його функціонування потрібен допоміжний сигнал, який формується схемою збудження. При цьому датчик 4 модулює його значення відповідно до зміннення контролюваного параметра.

Прикладом активного датчика є температурно-чутливий резистор (термістор), який працює від джерела постійного струму, що в цьому випадку є системою збудження. З виходів датчиків сигнали надходять на мультиплексор. Якщо вихідні сигнали датчиків є аналоговими (неперервними), то вони надходять на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), якщо цифровими — безпосередньо на комп'ютер.

Комп'ютер (пристрій керування) здійснює керування роботою мультиплексора й АЦП і надсилає керувальні сигнали до приводів. Приводи безпосередньо впливають на стан об'єктів контролю й керування та підтримують бажану траєкторію їх руху. Як приводи може бути використано електричні двигуни, реле, гідравлічні й пневматичні циліндри тощо. До складу системи контролю можуть входити також периферійні пристрої (накопичувачі інформації контролю, монітори, сигналізатори тощо) та інші компоненти, які не показано на рис. 2.3.

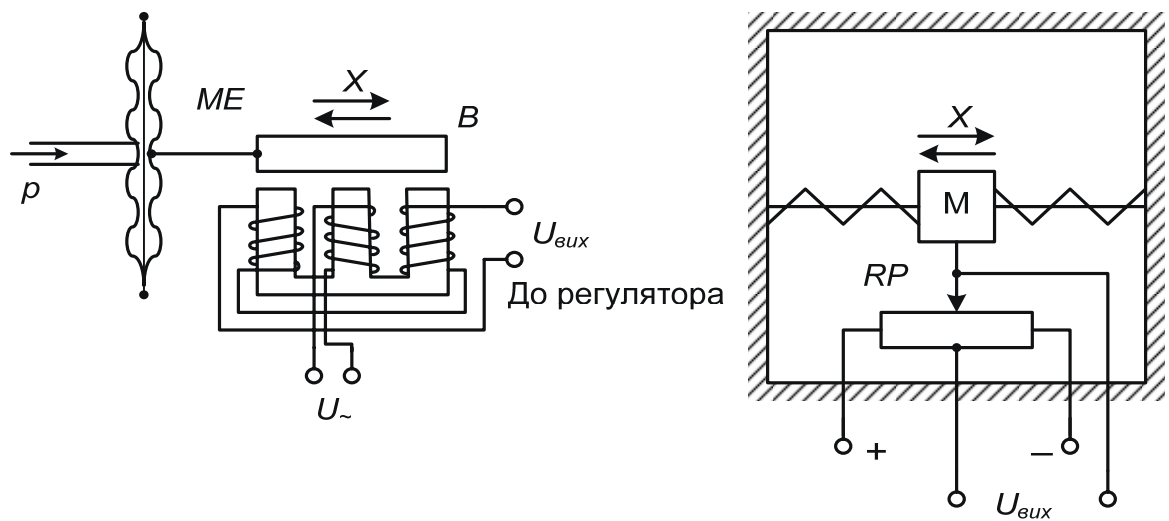
Залежно від вибору точки відліку зовнішнього сигналу датчики можна поділити на *абсолютні й відносні*. Абсолютний датчик визначає зовнішній сигнал в абсолютних фізичних одиницях, тоді як вихідний сигнал відносного датчика в кожному конкретному випадку трактується по-різному. Прикладом абсолютного датчика є термістор. Його електричний опір безпосередньо залежить від абсолютної температури й змінюється за шкалою Кельвіна. Навпаки, термопара є відносним датчиком, оскільки напруга на його виході є функцією ґрадієнта температури на спаю термопари. Іншими прикладами абсолютних і відносних датчиків є датчики тиску.

Показання абсолютного датчика відповідають значенням тиску, які не є нульовими. Для того щоб віднести датчик до тієї або іншої групи, необхідно знати, які величини з його допомогою можна вимірювати, якими є його характеристики, на якому фізичному принципі реалізовано, який механізм перетворень застосовано, з якого матеріалу виготовлено, якою є сфера його застосування.

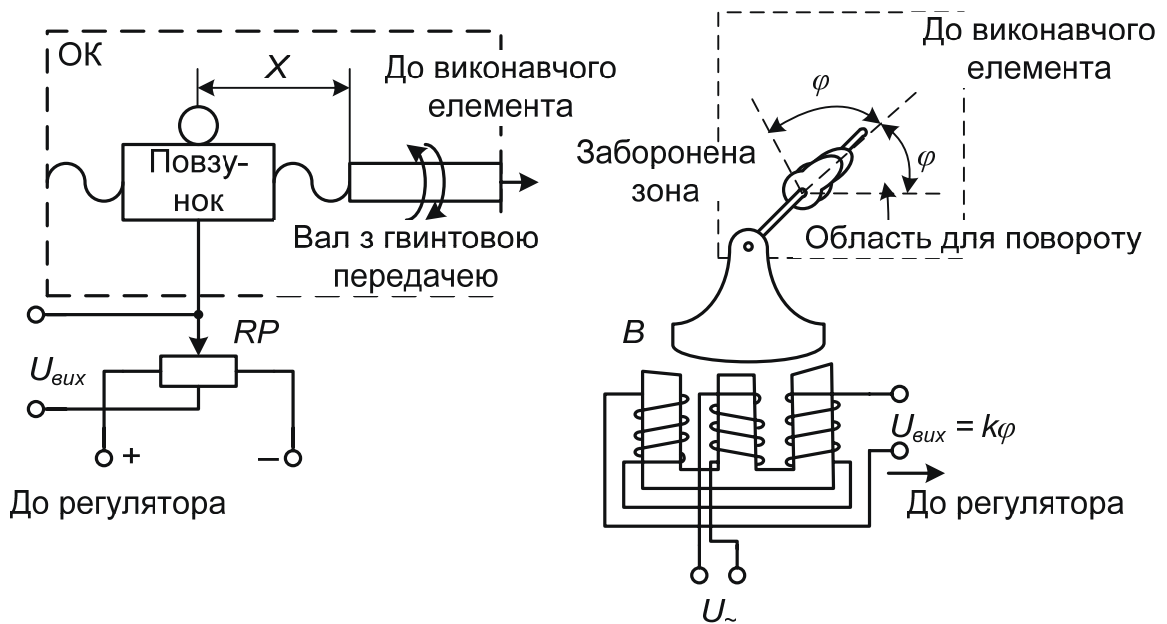
Аналізуючи наведені приклади, можна помітити, що датчики використовують різні види енергії додаткового джерела, різні фізичні принципи дії. Крім того, характер змінення їхніх вихідних сигналів може бути різним — неперервним, імпульсним, релейно-імпульсним тощо.

Важливою властивістю датчика є його здатність розрізняти змінення знака або фази вхідного сигналу. За цією властивістю датчики поділяють на *реверсивні (двотактні)*, у яких знак (фаза) вихідного сигналу змінюється у разі змінення знака вхідного сигналу, і *нереверсивні (однотактні)*, знак (фаза) вихідного сигналу яких не залежить від полярності вхідного.

Будь-яка система контролю й керування містить (як функціонально необхідні елементи) один або декілька датчиків (рис. 2.4), які призначено для одержання первинної інформації про стан об'єкта контролю й керування мехатронних систем.



а



б

Рис. 2.4. Схеми вмикання потенціометричного й індуктивного датчиків: а – виконання функцій вимірювання й перетворення; б – виконання функції перетворення сигналу; ОК – об'єкт керування, ПЕ – потенціометричний елемент; ІЕ – індуктивний елемент; МЕ – мембранний елемент; М – рухома маса акселерометра

Вимірювальний перетворювач (рис. 2.4, а) являє собою пристрій, що вимірює дійсне значення керованої або контрольованої координати, і перетворення цього значення на сигнал, є найбільш прийнятним для подальшого його передання через канал керування.

Слід зазначити, що елемент первинної інформації залежно від застосування може виконувати функції вимірювання й перетворення контрольованого параметра одночасно, а може здійснювати тільки перетворення. Так, наприклад, елементи потенціометричного й індуктивного типів, що використовуються для одержання інформації про об'єкт, керованою координатою якого є лінійне або кутове переміщення (рис. 2.4, а), потрібно розглядати як датчики, тому що ці елементи виконують функції вимірювання й перетворення керованого параметра одночасно.

Однак ці самі елементи автоматики, які використовуються, наприклад, для одержання інформації про інші фізичні параметри керування (тиск, швидкість або прискорення рухомого об'єкта), будуть виконувати тільки функції перетворювача (рис. 2.4, б), оскільки як датчики застосовуються інші чутливі до змінення цих параметрів елементи (мембранні й сильфонні приймачі тиску, акселерометри тощо).

Датчики сигналів можна поділити на *параметричні й генераторні*. Основою побудови датчиків параметричного типу є властивість змінення деякого параметра чотириполюсника при змінні його вхідної величини, унаслідок чого змінюється й вихідна величина чотириполюсника. Генераторні датчики перетворюють механічну енергію безпосередньо на енергію електричного сигналу керування.

За видом вимірюваної (перетворюваної) величини розрізняють датчики положення, швидкості, прискорення, тиску, температури й інших фізичних величин, що є технологічними параметрами, керування якими необхідно здійснювати при автоматизації виробничо-технологічних процесів або об'єктів.

За принципом дії розрізняють датчики *опору*: потенціометричні, тензометричні, фоторезисторні й терморезисторні; датчики *індуктивності й взаєміндуктивності*: індуктивні, індукційні, сельсини, мікросини, обертальні трансформатори; магнітоіндукційні, тахогенератори постійного й змінного струму та ін.

До характеристик датчиків ставлять такі вимоги [1—6, 27, 28]: висока динамічна точність (формування сигналу має здійснюватися з мінімальним спотворенням; ця вимога означає, що датчик повинен мати таку передатну функцію, яка в межах смуги пропускання об'єкта контролю й керування зводилася б до постійної величини); висока статична точність роботи; висока надійність роботи в умовах, передбачених виробничо-технологічною і технічною нормувальною документацією; допустимі габарити й маса; високий коефіцієнт перетворення, що забезпечує реагування датчика на відносно невеликі неузгодженості між необхідним і дійсним значеннями керованої величини; достатня потужність вихідного сигналу.

Для контролю технологічних процесів у мехатронних системах важливими є такі характеристики датчиків [4, 5, 28]: чутливість, коротко- і

довготермінова стабільність, точність, швидкодія, гістерезис, ресурс, вартість, маса, розміри, діапазон вихідних значень, роздільна здатність, вибірковість, лінійність, наявність мертвої зони та її характеристики, формат вихідного сигналу, характеристики у випадках перевантажень.

Відповідно до наведених вимог при вивченні й застосуванні датчиків різних типів необхідно приділяти суттєву увагу таким властивостям: статична характеристика датчика та її вид; значення чутливості або коефіцієнта перетворення; роздільна здатність; потужність шумів, що генеруються датчиком; потужність вихідного сигналу; потужність вхідного сигналу; динамічні характеристики. Наведена узагальнена класифікація датчиків за багатьма з розглянутих ознак не є вичерпною і при вивченні окремих функціональних елементів може уточнюватися.

У мехатронних системах є багато датчиків із вбудованими мікропроцесорами. Такі датчики називають *інтелектуальними* [28]. Узагальнену схему інтелектуального датчика показано на рис. 2.5.

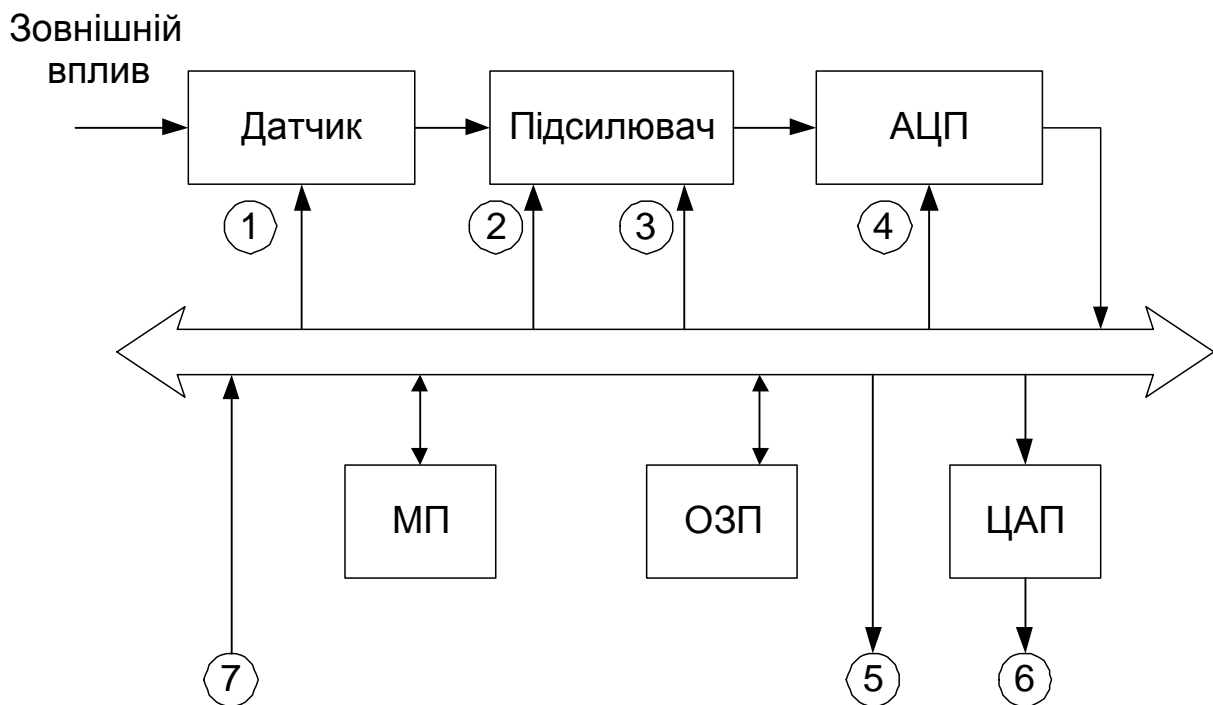


Рис. 2.5. Узагальнена структурна схема інтелектуального датчика

Датчиком керує мікропроцесор. Це дає змогу змінювати рівні збудження так, що перемикання датчика між діапазонами вхідних сигналів буде відбуватися автоматично. Крім того, можуть відслідковуватися температура довкілля, відносна вологість, тиск та інші параметри, а також коригування показань датчика з використанням аналогового підсилювача або даних, які зберігаються в мікропроцесорі.

Дуже цінною є можливість мікропроцесорного оброблення – отримання лінійного сигналу від нелінійного датчика з використанням таблиць відповідності, які зберігаються в запам'ятовувальному пристрої мікропроцесора. Це дає змогу створювати датчики з дуже низьким значенням коефіцієнта нелінійності.

Виходи датчика можуть бути як аналоговими, так і цифровими. Вхід зовнішнього керування дає змогу долучати прилад до складу системи контролю й керування складним об'єктом (технологічним процесом).

Такі датчики мають можливість відслідковувати аварійні режими роботи (значення сигналів тривоги, які свідчать про перевищення заданого значення сигналу й можуть оперативнo порівнюватися з допусками, що зберігаються в мікропроцесорі).

Окрім того, вбудований запам'ятовувальний пристрій можна використати для протоколювання вимірюваних даних з подальшим переданням протоколу на верхні рівні ієрархії системи контролю й керування.

2.3. Засоби оброблення даних у мехатронних системах

2.3.1. Вимоги до способів оброблення даних

Інформація в мехатронних системах обробляється в електронному блоці керування (ЕБК) або у вузлі, що складається із певної кількості таких блоків [4, 5]. Здебільшого ці блоки керування працюють як комп'ютери: приймають електричні сигнали від датчиків, оброблюють інформацію в реальному часі й генерують керувальні сигнали (рис. 2.6), які надходять на виконавчі пристрої.

Сигнали можуть бути аналоговими, цифровими або імпульсними. Аналогові вхідні сигнали (лямбда-зонда, датчиків тиску, потенціометрів, датчиків температури та ін.) можуть мати будь-яку величину напруги в межах певного діапазону (зазвичай 1...5 мВ).

Ці сигнали перетворюються в електронному блоці керування аналого-цифровим перетворювачем на цифрову форму для подальшого оброблення процесором мікроконтролера.

Цифрові вхідні сигнали (наприклад, від датчиків Холла, датчиків положення, магніторезисторних датчиків тощо) мають тільки два стани — логічної одиниці й логічного нуля. Ці сигнали можуть оброблятися безпосередньо в мікроконтролері.

Діапазон напруги — від нуля до величини напруги логічної одиниці. Імпульсні вхідні сигнали (інформація, що генерується періодично, наприклад, сигнали обмеження частоти обертання) обробляються з

допомогою спеціальної схеми в електронному блоці керування. Діапазон електричних напруг знаходиться в межах від 0,5 до 100 В.

Вхідні сигнали шляхом фільтрації значною мірою очищуються від завад і, якщо необхідно, шляхом підсилення адаптуються до припустимого рівня електричної напруги на вході мікроконтролера (до 5 В). Вхідними сигналами можуть бути не тільки сигнали від датчиків, але й сигнали від інших систем (за наявності декількох електронних блоків керування). В ЕБК сигнали зазвичай обробляються в цифровому вигляді.

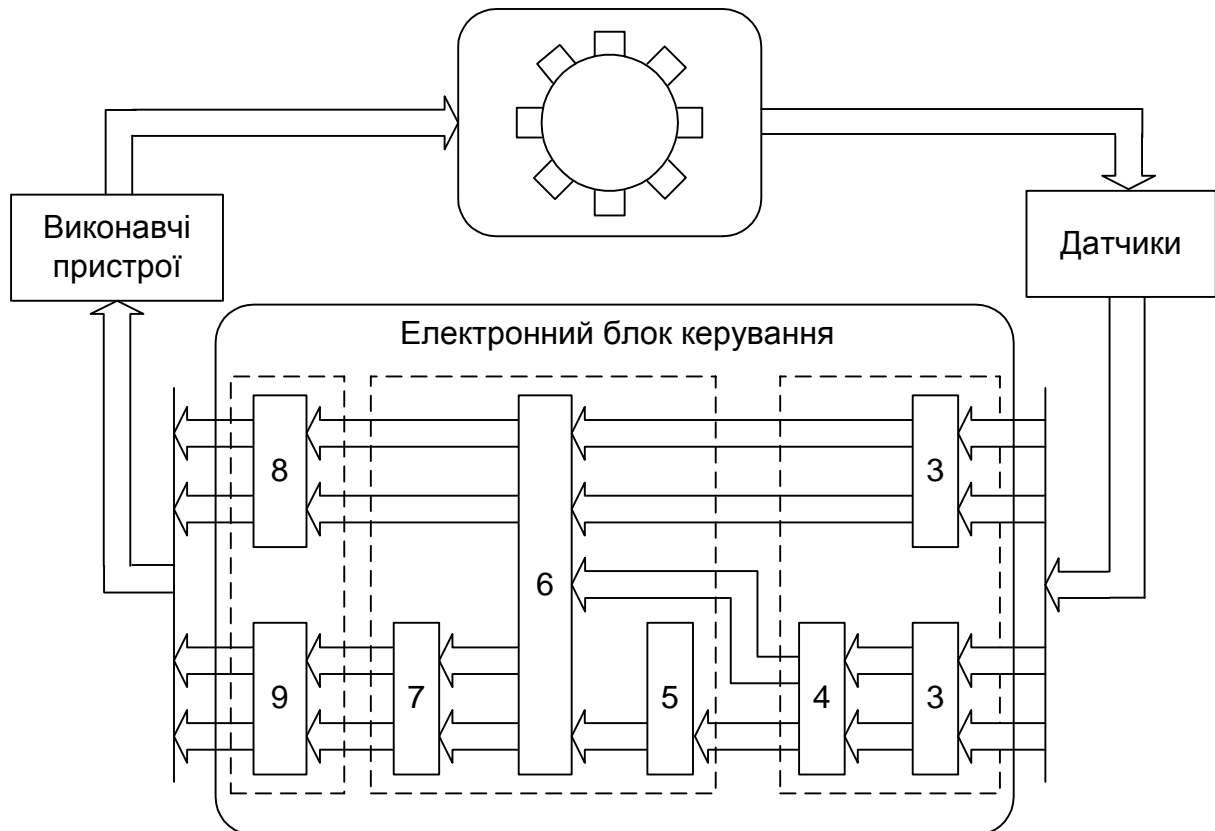


Рис. 2.6. Обмін інформацією між вузлами електронного блока керування мехатронної системи обробного модуля [4]: 1 — входи цифрових сигналів стану; 2 — входи аналогових сигналів стану; 3 — засоби захисту вхідних лагцюгів; 4 — підсилювачі; 5 — аналого-цифрові перетворювачі; 6 — засоби цифрового оброблення сигналів; 7 — цифро-аналогові перетворювачі; 8 — силові виходи; 9 — підсилювачі потужності

Під *сигналом* (рос. сигнал; англ. signal) у загальному випадку розуміють фізичний процес перенесення інформації в часі й просторі [2]. Обробленням називають перетворення сигналу з метою подання інформації, що міститься в ньому, у найбільш зручній формі.

Оброблення сигналів (signal processing) може здійснюватися з допомогою різних технічних засобів: аналогових, цифрових і гібридних (комбінація аналогових і цифрових засобів). Історично спочатку сигнали обробляли з допомогою аналогових засобів.

Приблизно з кінця 80-х років сигнали стали обробляти тільки цифровими методами. Цифрові системи є малочутливими до параметрів навколишнього середовища, їх можна адаптувати й легко перепрограмувати.

Цифрові сигнали можна зберігати в незмінному вигляді необмежений час. Цифрові алгоритми легко перевести з обладнання одного виробника на обладнання іншого.

Цифрове оброблення сигналів (рос. цифровая обработка сигналов; англ. digital signal processing) застосується для вирішення різноманітних завдань, наприклад фільтрації сигналів від завад, передання даних, оброблення і розпізнавання зображень, стиснення й редагування відеосигналів тощо [3].

Цифрові процесори оброблення сигналів (ЦПОС) (рос. цифровые процессоры обработки сигналов; англ. Digital Signal Processor — DSP) є програмовними мікропроцесорами [2], які призначено для реалізації алгоритмів цифрового оброблення сигналів. Їх розрізняють між собою за типом використовуваної арифметики, розрядністю і швидкодією. За типом арифметики всі ЦПОС поділяються на дві групи: з фіксованою і рухомою точками.

Відмітними характеристиками ЦПОС є операції, що підтримуються на апаратному рівні: високошвидкісне виконання операції множення з накопиченням MAC (MAC — Multiply Accumulate ($R \leftarrow R + ax$), де R — вміст регістра-акумулятора, a — множник, x — множене); багатократний доступ до пам'яті (дає змогу процесору звертатися до пам'яті декілька разів за час виконання однієї команди); спеціальні режими адресації; керування циклами; наявність на кристалі додаткових пристроїв уведення-виведення цифрових і аналогових сигналів.

Ці особливості архітектури обумовлені специфікою багатьох стандартних алгоритмів цифрового оброблення сигналів, для реалізації яких і розробляють ЦПОС.

Мікропроцесор (рос. микропроцессор; англ. microprocessor) — програмно-керований пристрій, призначений для оброблення цифрової інформації і керування процесом цього оброблення, який виконано у вигляді однієї (або декількох) інтегральної схеми з високим ступенем інтеграції електронних елементів [4].

Мікроконтролер (рос. микроконтроллер; англ. microcontroller) — функціонально закінчений мікропроцесорний керувальний пристрій, призначений для безпосереднього вбудовування в об'єкт керування, який має на одному кристалі крім власно мікропроцесора модулі пам'яті програм і даних, а також необхідні інтерфейсні схеми.

Мікроконтролери виконують функції логічного аналізу й керування (тому завдяки виключенню, наприклад, арифметичних операцій можна зменшити їхню апаратну складність або розширити функції логічного керування) [4]. Передусім мікроконтролери є ланцюгом перетворення

інформації, що надходить від датчиків, які вмонтовано у складові частини мехатронного об'єкта, до виконавчих пристроїв.

Програмне забезпечення містить необхідні алгоритми. У ньому може встановлюватися майже необмежена кількість логічних операцій для зберігання й оброблення даних у вигляді параметрів, характеристик і багатовимірних програмних карт.

До електронного блока керування ставляться жорсткі вимоги, оскільки ЕБК зазнає великих навантажень через сильні перепади температури, вплив агресивних експлуатаційних матеріалів, вологість та різні механічні (у тому числі вібраційні) навантаження. ЕБК має стабільно працювати як при низькій напрузі бортової мережі, так і при високій зарядній напрузі (коливання напруги в бортовій мережі).

Дуже високі вимоги ставлять стосовно чутливості до дії електромагнітних завад і обмеження на рівень випромінювання високочастотних сигналів перешкод.

2.3.2. Узагальнена структурна схема електронного блока керування

Електронні блоки керування мехатронних систем містять зазвичай як процесор (CPU) для виконання арифметичних і логічних операцій, так і спеціалізовані модулі для оброблення зовнішніх сигналів (сигналів стану) і формування керувальних сигналів (сигналів керування). Ці периферійні модулі забезпечують повне керування операціями в реальному часі.

Програмно-керований центральний процесор міг би керувати цими операціями тільки шляхом ускладнення й обмеження кількості функцій. На рис. 2.7 показано узагальнену схему ЕБК на базі типового мікрокомп'ютера [4].

Електронний блок керування складається з елементів, які змонтовано на платі як інтегральні цифрові схеми:

- CPU (central processor unit) — мікропроцесор для логічного і математичного оброблення даних (відповідно до програмного забезпечення);

- Counter/Timer — тактовий лічильник;

- ОЗП (оперативний запам'ятовувальний пристрій) RAM (random access memory) — елементи пам'яті з доступом для читання й запису інформації;

- ПЗП (постійний запам'ятовувальний пристрій) ROM (read only memory) пам'ять тільки для читання інформації (вміст цього програмованого запам'ятовувального пристрою визначається під час

виготовлення і не може змінюватися);

- PROM (programmable ROM) — програмована пам'ять;
- EPROM (erasable PROM) — програмована пам'ять із можливістю стирання шляхом опромінення ультрафіолетовими променями й записування даних програмувальним пристроєм;
- EEPROM (electr. erasable PROM) — програмована пам'ять із груповим електричним стиранням;
- Parallele I/O — паралельні входи-виходи;
- Serialle I/O — послідовні входи-виходи;
- Bus I/O — входи-виходи комутації із зовнішніми портами через шину.

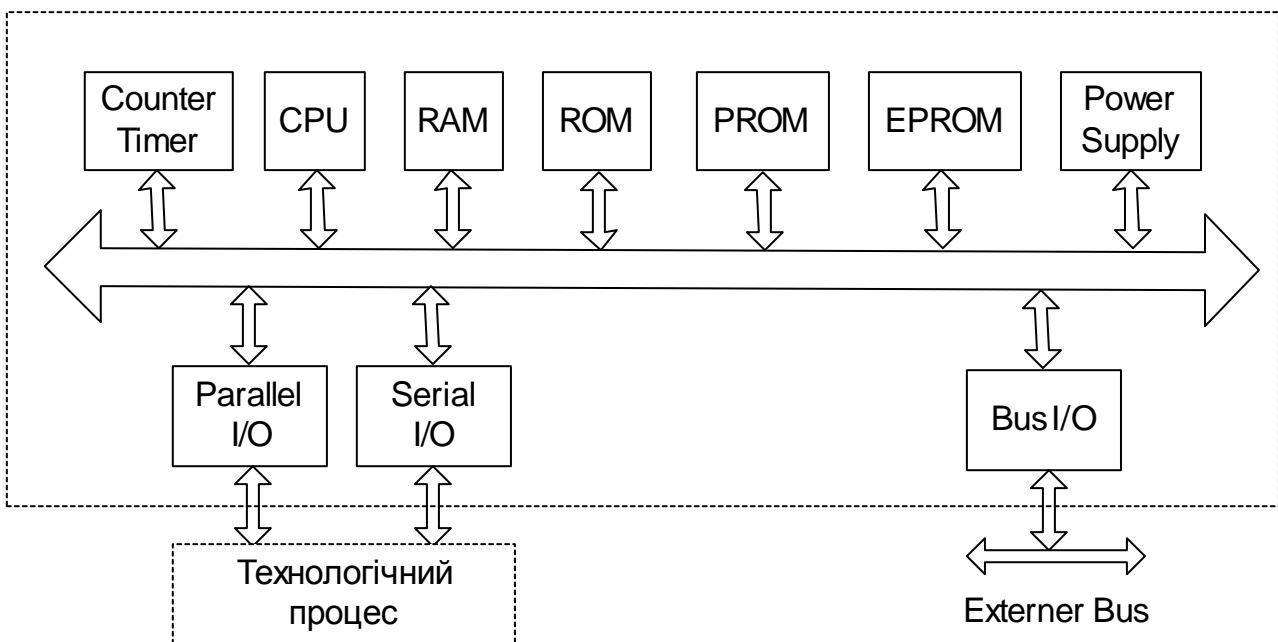


Рис. 2.7. Структурна схема блока цифрового оброблення сигналів (мікрокомп'ютера): Counter Timer – генератор; CPU – процесор; RAM – пристрій оперативної пам'яті; ROM – пристрій постійної пам'яті; PROM – програмований пристрій оперативно-постійної пам'яті; EPROM – електрично-програмований пристрій постійної пам'яті; Power Supply – блок живлення; Parallel I/O – канал паралельного введення-виведення; Serial I/O – канал послідовного введення-виведення; Bus I/O – шина введення-виведення; Externer Bus – зовнішня шина

Основні елементи ЕБК зображено на рис. 2.8 [4]. Керувальний модуль дешифрує інформацію про коди команд і керує виконанням завдань. Обчислювальний модуль виконує логічні й арифметичні операції над даними.

Модуль пам'яті зберігає команди, константи, вхідну, проміжну й вихідну інформацію і працює як швидка проміжна пам'ять під час виконання команд. Блок спряження (інтерфейс шин) — елемент з'єднання шини мікрокомп'ютера, RAM, ROM, I/O.

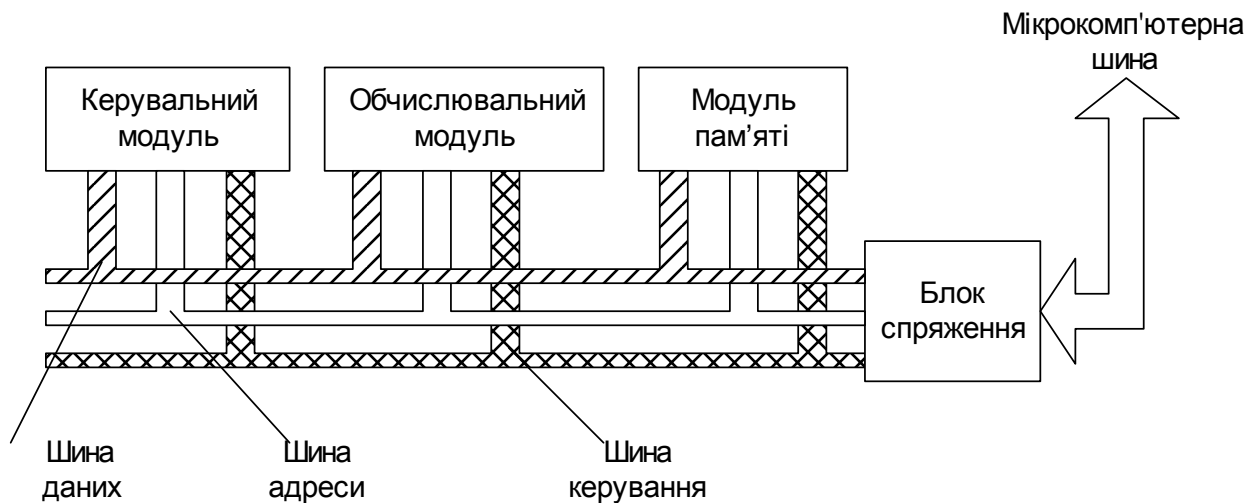


Рис. 2.8. Основні компоненти електронного блока керування

Продуктивність CPU визначають тактова частота, середня кількість тактів, необхідних для виконання однієї команди, довжина слова, кількість кодів команд тощо.

З допомогою вихідних сигналів вмикаються вихідні каскади. Силкові виходи й вихідні підсилювачі дають змогу збільшити потужність вихідних сигналів мікропроцесора до напруг в десятки або сотні вольт, струму в декілька ампер.

Вихідні сигнали також можуть бути аналоговими (для цього потрібні цифро-аналогові перетворювачі) і цифровими.

2.4. Канали обміну інформацією в мехатронних системах

2.4.1. Загальні відомості

Використання інформації в мехатронних системах пов'язане з її переданням від датчиків до ЕБК і від ЕБК до виконавчих пристроїв (приводів) (див. рис. 2.6).

Інформація — це відомості про предмети, явища, об'єкти, системи, процеси об'єктивної дійсності, які можна зберігати, передавати й приймати та перетворювати. Інформацію можна подати словами, у вигляді чисел, формул, описів, креслень, символів, образів, тексту, показань приладів, стимулювальних дій, команд керування (керувальних дій) і т. ін. Далі внутрішню інформацію про об'єкт будемо називати інформацією джерела

(ІД). Усю інформацію або її частину можна передавати. Інформація, яку передають, має назву повідомлення.

Частину повідомлення, прийняту іншим об'єктом (адресатом), називають зовнішньою інформацією (або власне інформацією). Зовнішня інформація виявляється під час обміну відомостями між об'єктами. Зв'язок між повідомленнями, інформацією й сигналами показано на рис 2.9.

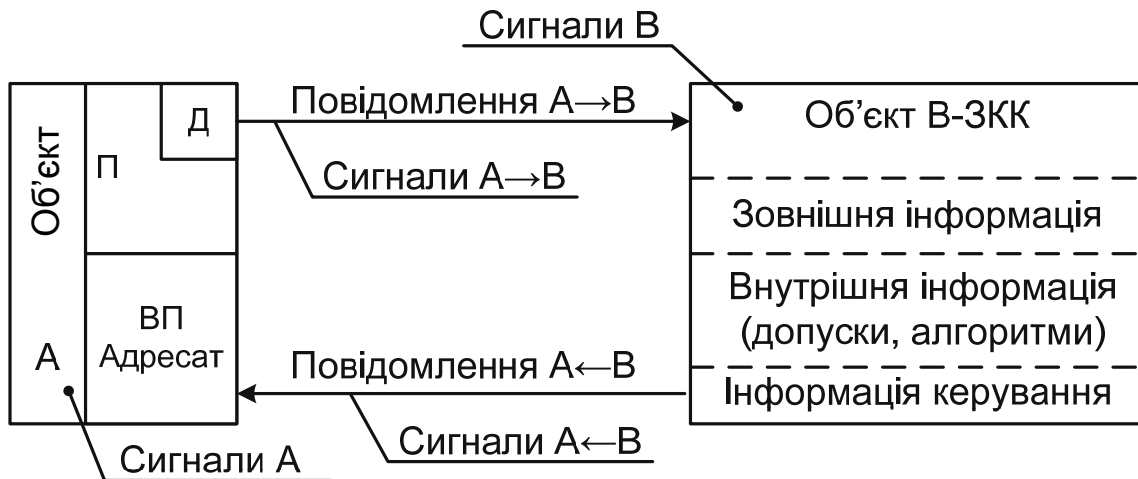


Рис. 2.9. Зв'язок між відомостями, повідомленнями, інформацією і сигналами

При цьому один і той самий об'єкт (суб'єкт) може бути як джерелом, так і отримувачем (адресатом) інформації за наявності двостороннього зв'язку між ними.

Зберігання, генерація, передання, перетворення й приймання інформації здійснюється сигналами, тобто матеріальним носієм інформації є сигнал. Сигналом може бути або фізичний процес зі змінюваними параметрами або речовина, стан якої точно відповідає відомостям про джерело інформації або змісту повідомлення, яке передається.

Розглянемо процес циркуляції інформації від об'єкта контролю і керування і до нього (рис. 2.10).

Оскільки носієм інформації є сигнал, то цей процес можна розглядати і як процес обертання і перетворення сигналів. На об'єкт впливає зовнішнє середовище. Унаслідок цієї дії об'єкт контролю й керування змінює свої властивості. Ці зміни мають своєчасно виявлятися.

Виявлення (генерація) зміненої властивості об'єкта контролю й керування і є початком процесу циркуляції інформації в мехатронній системі. Це виявлення необхідно зафіксувати (сприйняти) засобами контролю й керування.

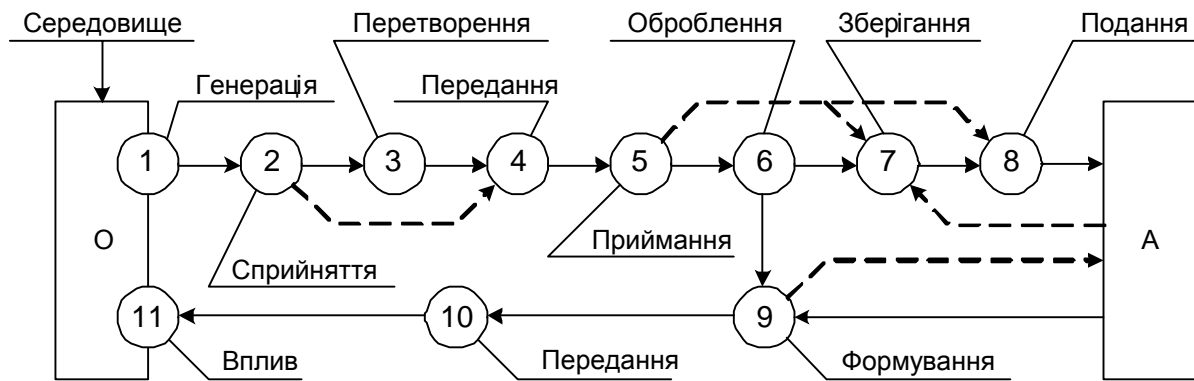


Рис.2.10. Процес циркуляції інформації

При фіксуванні (сприйнятті) формується повідомлення про змінення властивостей (станів) об'єкта. При цьому може проводитися первинне оброблення (перетворення) отриманих відомостей, відокремлення корисних сигналів від завад.

Під перетворенням розуміють операції нормалізації, квантування, кодування, модуляції та інші, які роблять сигнал (повідомлення) більш завадостійким і зручним для передання.

Передання повідомлень полягає в перенесенні їх на відстань з допомогою сигналів різної фізичної природи. Це перенесення здійснюється через канали передачі (електричні, механічні, гідравлічні, пневматичні, акустичні, електричні, електромагнітні).

Приймання повідомлень на другому боці каналу має характер вторинного сприйняття з властивими йому операціями (демодуляції, декодування та ін.), виокремлення корисного сигналу на фоні завад.

Отримані повідомлення оброблюються за певними законами (алгоритмами) у засобах керування. Проміжним станом оброблення повідомлення може бути зберігання його або його частини в пам'яті.

Під час оброблення повідомлень визначається новизна повідомлення (тобто виявляється відносна зовнішня інформація). Адресату (**A**) може подаватися інформація як після оброблення так і безпосередньо після приймання. На основі отриманих даних формується керувальний (або стимулювальний) сигнал, який передається на об'єкт контролю й керування.

Таким чином, процес циркуляції інформації між вузлами мехатронних систем містить такі операції (див. рис. 2.10): генерація (1), сприйняття (2), перетворення (3), передання (4), приймання (5), оброблення (6),

зберігання (7), подання (8), формування (генерація) зворотного сигналу (9), його передання (10) і вплив (11) на об'єкт контролю й керування.

Для реалізації цих операцій використовуються різні пристрої, прилади, блоки, елементи й цілі підсистеми, до яких належать:

а) датчики — для генерації і сприйняття інформації про стан об'єкта або його окремих частин;

б) перетворювачі сигналів — для їх нормалізації, підсилення, модулювання, квантування, кодування тощо, тобто для подання завадостійких сигналів під час передання, а також для їх демодуляції, декодування тощо, тобто для виокремлення корисного сигналу на тлі завад;

в) передавачі — для узгодження сигналів з лінією зв'язку;

г) приймачі — для приймання сигналів з лінії зв'язку (приймачі й передавачі є різновидом перетворювачів сигналів);

д) пристрій оброблення інформації (наприклад, розв'язувальний або операційний пристрій);

е) запам'ятовувальні пристрої;

ж) формувачі — для визначення й формування сигналів зворотного зв'язку або формування сигналів з певними характеристиками (за формою, величиною, часом і т. ін.);

и) виконавчі пристрої — для безпосередньої дії на об'єкт.

Таким чином, можна отримати різні варіанти структурних схем систем контролю й керування. На рис. 2.11, а зображено один із можливих варіантів структурної схеми мехатронної системи (МС).

Повідомлення C_1 від датчика Д об'єкта контролю й керування ОКК через перетворювач П, передавач ПРД, лінію зв'язку ЛЗ, приймач ПРМ, розв'язувальний пристрій РП надходить до засобів контролю й керування ЗКК, де обробляється й за необхідності формується зворотне повідомлення C_2 , яке каналом зворотного зв'язку КЗЗ передається на виконавчий пристрій ВП об'єкта контролю й керування.

Для деталізації структурної схеми виділимо на об'єкті контролю й керування датчики Д, вимірювачі В, комутатори К, перетворювачі П, виконавчі пристрої ВП, узгоджувальні пристрої УП. Датчики, вимірювачі, комутатори, перетворювачі, з'єднані певним чином, утворюють пристрій збору інформації (ПЗІ).

Серед засобів контролю й керування, що використовують процес циркуляції інформації (див. рис. 2.10, фази 5, 6, 7, 8, 9), виділимо пристрій оброблення інформації ПОІ, запам'ятовувальний пристрій ЗП, пристрій подання інформації ППІ, формувач зворотних сигналів ФЗС і пристрій керування ПК (рис. 2.11, б).

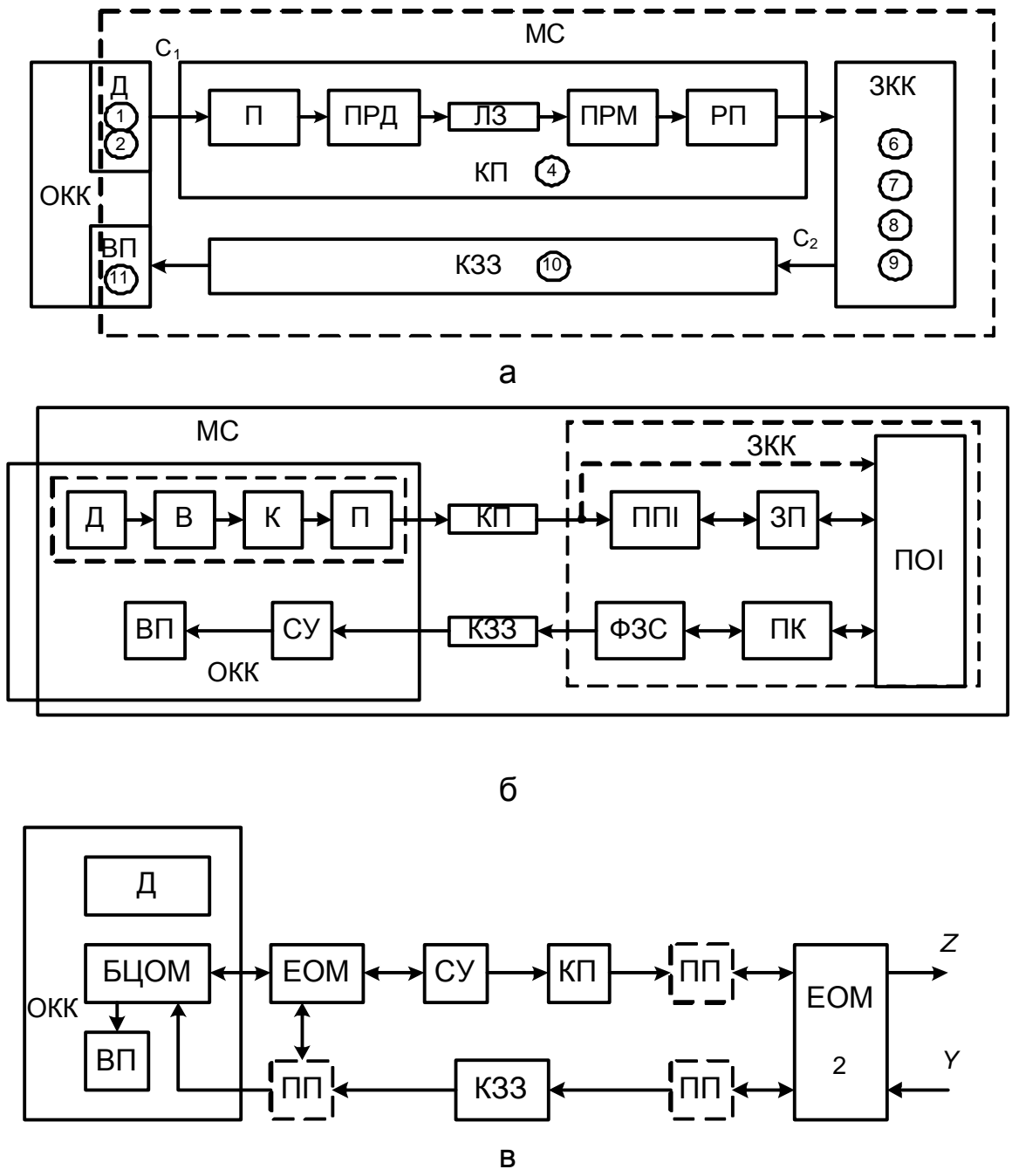


Рис. 2.11. Структурні схеми мехатронних систем КІВ

Датчики сприймають різні зміни на об'єкті контролю й керування і перетворюють їх на електричні сигнали, які надходять на вимірювачі, що виконують операції порівняння з мірою, квантування, кодування і т. ін. Частину операцій вимірювачів можуть виконувати перетворювачі. Вимірювачі й перетворювачі часто виконують і операції узгодження сигналів між датчиками й каналами передання.

Комутатори забезпечують почергове підмикання одних пристроїв до інших: наприклад, вимірювача через перетворювач до каналу передачі, як

зображено на рис. 2.11, б, або датчиків до вимірювача (на рис. 2.11, б це не показано).

Таким чином, датчики, комутатори й перетворювачі забезпечують збір інформації про об'єкт, її попереднє оброблення за певним алгоритмом і видачу повідомлення в канал передачі. Повідомлення з каналу передачі КП надходять у пристрій оброблення інформації ПОІ, де оброблюються за певним алгоритмом.

Отримані під час оброблення результати (зовнішня інформація) або запам'ятовуються, або передаються адресату через пристрій подання інформації, або на її основі формується зворотний сигнал, або ця інформація надходить одночасно на декілька або на всі названі вище пристрої. Пристрій керування організовує взаємодію всіх пристроїв мехатронних систем (СКК) за заданим певним алгоритмом.

Сучасні мехатронні системи будуються з використанням ЕОМ, мікро-ЕОМ, мікропроцесорів, мікропроцесорних систем (див. рис. 2.11, в), у яких реалізуються функції ПОІ, ЗП, ФЗС, ПК, ППІ. Для узгодження сигналів датчиків, ЕОМ, каналів передання, виконавчих пристроїв за необхідності використовуються узгоджувальні пристрої (УП).

Передання здійснюється в просторі й часі. Залежно від того, який фактор є визначальним, розглядають передання на відстань, у часі або на відстань і в часі. Споживач використовує інформацію на відстані від джерела завдяки каналам передання.

Під каналом передання інформації розуміють усю сукупність технічних засобів, які забезпечують передання інформації від джерела її виникнення (об'єкта) до споживача (адресата). У цьому випадку канал передання містить передавач, лінію зв'язку і приймач. Якщо в каналі передання інформація передається неперервними сигналами, то такий канал називають неперервним, якщо дискретними сигналами, то дискретним. Канали передання інформації класифікують за призначенням, властивостями (типами) лінії зв'язку, діапазоном частот, властивостями сигналів на вході і виході тощо.

Визначальним елементом каналу передання є лінія зв'язку – фізичне середовище, по якому передаються сигнали. Лінія зв'язку визначає апаратну реалізацію передавальної і приймальної сторін каналу.

Лініями зв'язку для механічних сигналів є механічні, гідравлічні, пневматичні сполучення. Для акустичних каналів лініями зв'язку є суцільне середовище (тверде, рідке, газоподібне), для електричних каналів – електричні проводи, для оптичних – оптичне прозоре середовище, для радіоканалів – ефір. Основною, але не єдиною ознакою каналів, є діапазон їхніх робочих частот (смуга пропускання) сигналів.

У мехатронних системах застосовують механічні, акустичні, оптичні, електричні і радіоканали, які різняться за лініями зв'язку і фізичною природою сигналів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Вид каналу	Лінія зв'язку	Різновиди каналів	Робочий діапазон		L, км
			F, Гц	λ , м	
Механічний	Механічні, гідравлічні, пневматичні, сполучення	Жорсткі	—	—	менше 0,04
		Гідравлічні	—	—	менше 0,01
		Пневматичні	—	—	менше 0,5
Акустичний	Тверде, рідке, газоподібне середовище	Звукові	менше $20 \cdot 10^3$	менше $15 \cdot 10^{-3}$	10
		Ультразвукові	більше $20 \cdot 10^3$	більше $15 \cdot 10^{-3}$	менше 2
Електричний	Електросередовище	Підтональні частоти	200	більше $1,5 \cdot 10^6$	10^k ($k < 5$)
		Тональні частоти	300...3400	$(90 \dots 10^3) \cdot 10^3$	
		Надтональні частоти	4000...8500	$(32 \dots 75) \cdot 10^3$	
		Високо-частотні	більше 10^4	менше $3 \cdot 10^4$	
Радіо	Радіо-середовище	ДХД	$0,9 \cdot 10^6$	більше 10^3	—
		КХ	10^6	200...1000	—
		СХД	$(1,5 \dots 6) \cdot 10^6$	50...200	—
		УКХ	$(6 \dots 30) \cdot 10^6$	10 ...50	—
		ЦД	$30 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^{12}$	0,0001...10	—
Оптичний	Оптичне (прозоре) середовище (світловоди)	Інфрачервоні хвилі	$(3 \dots 400) \cdot 10^{12}$	—	—
		Світлові хвилі	$(4 \dots 6) \cdot 10^{14}$	—	
		Ультрафіолетові хвилі	$(1 \dots 100) \cdot 10^{14}$	—	
		Рентгенівське проміння	$10^{16} \dots 10^{20}$	—	
		Гамма-проміння	$10^{20} \dots 10^{22}$	—	

2.4.2. Механічні канали

Механічні канали застосовують для передання на невеликі відстані (до 500 м) сигналів у вигляді механічних зусиль або тисків. Жорсткі механічні канали, передають зусилля або тиски на відстані до декілька десятків метрів.

У гідравлічних каналах передання зусиль або тисків є ще меншим (до декількох метрів) через погані динамічні властивості цих каналів. Сигнали по пневматичних каналах передаються шляхом змінення тиску.

Довжина пневматичних каналів досягає декількох сот метрів. Серед механічних каналів пневматичні набули найбільшого поширення завдяки використанню уніфікованих пневматичних систем контролю і регулювання на підприємствах з вибухово- і пожежонебезпечним середовищем. Такі канали передачі інформації складаються з пневматичного датчика (або перетворювача-формуваача тиску газу, пропорційного вимірюваному процесу), пневматичної лінії зв'язку і перетворювального приладу (пристрою) на виході системи. Недоліком таких систем є тривалі перехідні процеси в пневматичних лініях зв'язку, особливо в лініях великої довжини.

2.4.3. Акустичні канали

В акустичних каналах інформація передається коливанням у суцільних звукопровідних матеріалах і середовищах. Акустичні системи набули широкого застосування: акустичний контроль механічних об'єктів, ультразвукова дефектоскопія, акустичне виявлення об'єктів (підводних човнів, суден, літаків), гідролокація, акустичний зв'язок та ін.

Акустичні системи можуть бути активними й пасивними. У пасивній системі джерелами звуку є контрольовані або виявлені об'єкти. В активних системах (ультразвукова дефектоскопія, локація, зв'язок) акустичні сигнали формуються спеціальними генераторами. Як джерела і приймачі звукових (до 20 кГц) та ультразвукових (понад 20 кГц) коливань використовуються магнітострикційні матеріали.

2.4.4. Електричні канали

Електричні канали на провідних лініях зв'язку набули найбільшого застосування. Електрична лінія зв'язку являє собою послідовне з'єднання великої кількості чотиріполюсників (рис. 2.12).

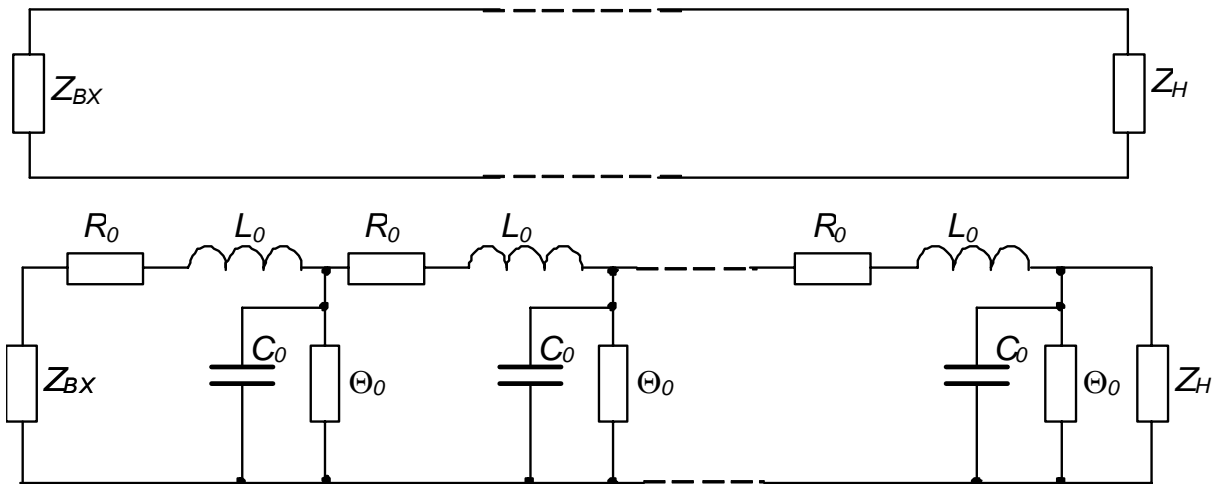


Рис. 2.12. Схема заміщення проводової лінії зв'язку

На рисунку через R_0 позначено активний опір проводу, що припадає на одиницю довжини (зазвичай на 1 км), опір залежить від матеріалу ρ_0 , перерізу проводу S , температури зовнішнього середовища t і частоти сигналів ω (при збільшенні частоти опір R_0 збільшується через наявність поверхневого ефекту), $R_0 = R(\rho_0, S, t, \omega)$; L_0 – індуктивність на одиницю довжини, яка залежить від матеріалу проводу ρ_0 , перерізу проводів S , відстані між проводами r , частоти сигналів ω і температури середовища t , $L_0 = L(\rho_0, S, r, t, \omega)$; C_0 – ємність витoku, яка залежить від матеріалу проводу ρ_0 , перерізу проводів S і відстані між ними r , $C_0 = C(\rho_0, S, r)$; Θ_0 – провідність ізоляції, яка залежить від провідності матеріалу ізоляції b , вологості ρ і частоти сигналів ω , $\Theta_0 = \Theta(b, \rho, \omega)$. Такі лінії можуть бути повітряними й кабельними.

Параметри R_0, L_0, C_0, Θ_0 називають первинними параметрами ліній зв'язку. Деякі з них наведено в табл. 2.2 (діаметр проводу 4 мм).

Таблиця 2.2

Найменування первинного параметра	Одиниця виміру	Лінія зв'язку		
		Повітряна		Кабельна
		Мідь	Сталь	Мідь
Опір R_0	Ом/км	2,84	42,2	~0,25
Індуктивність L_0	МГн/км	~2,0	~9,0	~0,27
Ємність C_0	Ф/км	$6 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-9}$
Провідність Θ_0	$\text{Ом}^{-1} \cdot \text{км}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$

Примітка. Для чистої міді $R_0 = 0,17$ Ом/км.

Крім первинних лінії зв'язку характеризуються вторинними параметрами: хвильовим опором Z_0 , загасанням β і коефіцієнтом поширення γ .

2.4.5. Радіоканали

Радіоканали набули широкого розповсюдження для передання інформації стану й керування в мехатронних системах [10, 13].

За діапазоном частот радіосигналів розрізняються такі канали:

- довгохвильового діапазону (довжина хвилі $\lambda > 1000$ м);
- середньохвильового діапазону ($200 < \lambda < 1000$ м);
- проміжного діапазону ($50 < \lambda < 200$ м);
- короткохвильового діапазону ($10 < \lambda < 50$ м);
- ультракороткохвильового діапазону ($0,0001 < \lambda < 10$ м).

Характеристики радіоканалу визначаються властивостями відбиття й поглинання радіохвиль земною поверхнею і атмосферою (рис. 2.13).

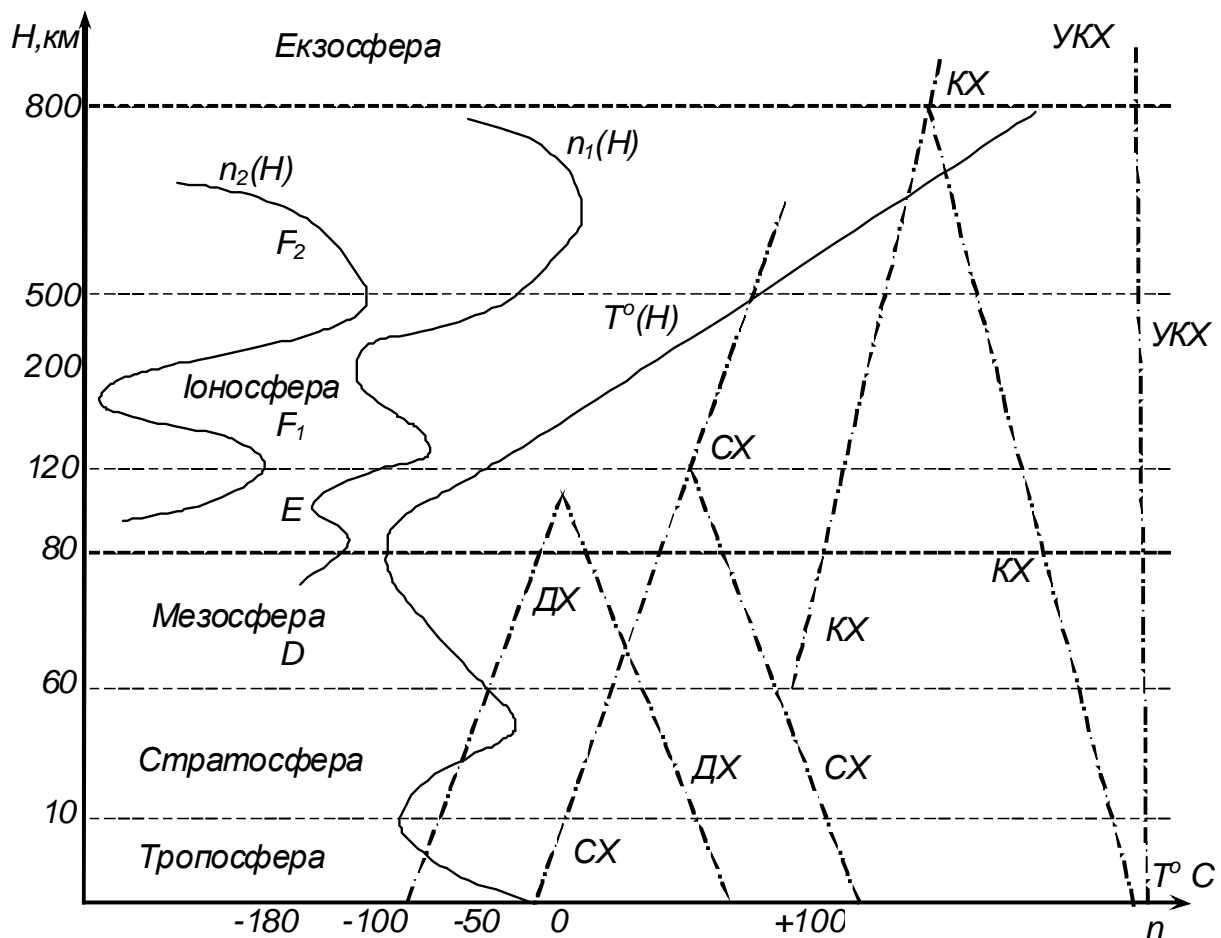


Рис. 2.13. Характеристика атмосфери

З усіх шарів атмосфери найбільш істотно впливає на поширення радіохвиль іоносфера (термосфера), яка розташована між висотами 80 і 800 км. Гази в ній здебільшого перебувають у вигляді електронів, іонів, заряджених атомів і молекул. Їх іонізація є результатом впливу сонячних променів, космічного проміння і метеорних часток.

При великій концентрації іонів газу стають електропровідними. У деяких шарах іоносфери концентрація вільних електронів досягає трохи більшої величини. Відомо чотири такі шари: на висотах 60 – 80 км (шар D), 100 – 120 км (шар E), 180 – 200 км (шар F_1), 300 – 400 км (шар F_2) (рис. 2.13, криві $n(H)$).

Ступінь іонізації істотно залежить від часу доби й активності Сонця. Уночі ступінь іонізації набагато менший, ніж удень. Змінення концентрації іонів зі зміненням висоти обумовлює неперервне змінення кута заломлення радіохвиль. Унаслідок цього хвилі поширюються криволінійно.

Частина хвиль (в основному середні радіохвилі) відбиваються від шару E (рис. 2.13, криві DX , CX), друга частина (в основному короткі хвилі) – від шару F іоносфери (рис. 2.13, крива KX), третя частина – «пробиває» обидва шари і виходить за межі земної атмосфери (рис. 2.13, крива UKX).

Заломлювальна здатність іоносфери є неоднаковою для різних типів хвиль і зменшується зі зменшенням довжини хвилі. Хвилі, які поширюються внаслідок відбиття від іоносфери, носять назву просторових.

Завдяки дифракції (властивості обгинання) крім просторових мають місце поверхневі хвилі. Чим менше довжина поверхневої хвилі, тим швидше вона згасає (унаслідок утрат у земній поверхні) і тим повільніше – просторова хвиля.

Довгі хвилі повністю відбиваються від шару E (див. рис. 2.13, крива DX). Ультракороткі хвилі не відбиваються і виходять за межі земної атмосфери (див. рис. 2.13, крива UKX). Сигнали решти діапазонів відбиваються від іонізованих шарів E і F (див. рис. 2.13, криві CX , KX).

На практиці широко застосовуються радіорелейні канали передачі інформації на UKX . Приймально-передавальні станції розташовуються в межах прямої видимості.

Для дециметрових радіохвиль як лінії зв'язку застосовують хвилеводи. Хвилевід являє собою порожнисту металічну трубу, яка використовується для передачі електромагнітної енергії на частотах $35 \cdot 10^9 \dots 80 \cdot 10^9$ Гц.

Під час передачі у хвилеводі збуджуються кругові хвилі, які наводять у його стінках кільцеві струми. Ці струми забезпечують екранізацію, тобто перешкоджають виходу електромагнітної енергії за межі хвилеводу. Відмітною особливістю хвилеводів є зменшення втрат зі збільшенням частоти. Це дає змогу вести передачу інформації на дуже високих частотах і з меншими втратами порівняно з іншими видами ліній зв'язку.

2.4.6. Оптичні канали

В оптичних каналах передачі інформації за лінії зв'язку використовують закриті напрямні оптичні системи (світловоди) [7]. За діапазоном використовуваних довжин хвиль оптичні канали поділяються на такі:

- канали інфрачервоних хвиль (довжина хвилі $0,75 < \lambda < 100$ мкм);
- канали світлових хвиль (видимого спектра) (довжина хвилі $0,38 < \lambda < 0,75$ мкм);
- канали ультрафіолетових хвиль (довжина хвилі $0,005 < \lambda < 0,38$ мкм).

Властивості оптичних каналів визначаються оптичним середовищем. Створення оптичних каналів дасть змогу в майбутньому передавати інформацію великих обсягів і на надзвичайно далекі відстані.

У мехатронних системах застосовують оптичні канали, які працюють з інфрачервоним промінням. Максимум інтенсивності випромінювання більшості тіл припадає на область інфрачервоних хвиль. Цю їхню властивість широко використовують, наприклад, у вимірвальній техніці.

Контрольні запитання

1. Назвіть призначення виконавчих механізмів.
2. Обґрунтуйте переваги й недоліки електромеханічних виконавчих механізмів.
3. Обґрунтуйте переваги й недоліки гідромеханічних виконавчих механізмів.
4. Обґрунтуйте переваги й недоліки пневматичних виконавчих механізмів.
5. Дайте означення датчика.
6. Наведіть узагальнену структуру датчика.
7. Обґрунтуйте склад інтелектуального датчика.
8. Назвіть складові частини електронного блока керування.
9. Обґрунтуйте призначення головних компонентів електронного блока керування.

3. ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ І ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

3.1. Стадії життєвого циклу мехатронних систем

Будь-який виріб (мехатронна система) виникає не відразу, а проходить кілька стадій розвитку. Весь період часу від задуму про розробку виробу до моменту виведення його з експлуатації становить його життєвий цикл.

Протягом цього періоду змінюється стан виробу під впливом виконаних робіт, які проводяться у різних часових і просторових межах, мають різну суть і матеріально-технічне забезпечення. Тому життєвий цикл не є однорідним процесом і його поділяють на стадії (рис. 3.1).

Стадія — це частина життєвого циклу, що характеризується певним станом виробу, сукупністю видів передбачених робіт і їх кінцевими результатами.

Структура життєвого циклу (в просторі й часі) формується за послідовно-паралельним принципом реалізації його станів. Виконання наступних стадій може починатися ще до завершення робіт на попередній стадії. Для типового життєвого циклу розрізняють такі стадії виробу (системи): дослідження й обґрунтування розробки; розроблення; виробництво; експлуатація; виведення з експлуатації.

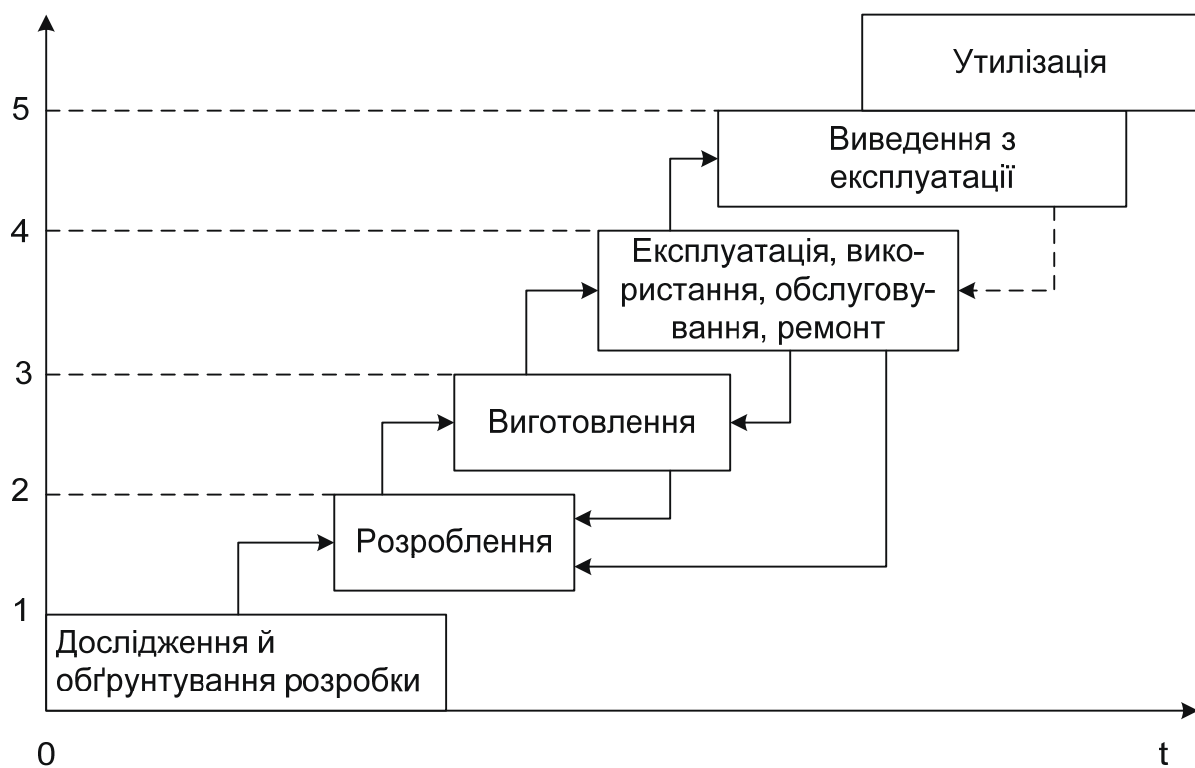


Рис. 3.1. Взаємозв'язок стадій життєвого циклу мехатронної системи

На стадії «Дослідження й обґрунтування розробки» провадять такі заходи:

- обґрунтування можливості й доцільності створення мехатронної системи (виробу);

- формування рівня якості виробу (проекту технічного завдання або технічних пропозицій), що відповідає сучасним досягненням науково-технічного прогресу, тенденціям розвитку виробів за даними вітчизняної і зарубіжної інформації;

- пошук методів створення виробу, які відповідають п. 2;

— обґрунтування концепції утилізації виробу [3].

На стадії «Розроблення» виконують такі роботи:

- розроблення робочої конструкторської документації (РКД), технологічної документації (ТД) для виготовлення й випробування дослідного (головного) зразка (або дослідної партії);
- виготовлення дослідного зразка;
- проведення попередніх, приймальних (державних, міжвідомчих) випробувань;
- коригування РКД, ТД і дороблення дослідного зразка за результатами приймальних випробувань;
- затвердження РКД і ТД для організації серійного (масового) виготовлення виробів.

Стадія «Виробництво» складається з таких операцій:

- організаційні заходи з підготовки виробництва до виготовлення виробів на промисловому підприємстві;
- виготовлення виробів за РКД і ТД відповідно до планових завдань і з рівнем якості, визначеним на стадії «Розроблення»;
- підвищення якості виробів на основі досвіду експлуатації;
- удосконалення технології виробництва й конструкції виробу за умови дотримання встановлених техніко-економічних показників.

На стадії «Експлуатація» виконують такі роботи:

- введення (прийняття) до експлуатації виробів, що надійшли (монтаж, наладка, випробування);
- приведення виробів до певного ступеня готовності для застосування за призначенням;
- підтримання виробів у певному ступені готовності для застосування за призначенням протягом певних термінів;
- застосування виробу за призначенням відповідно до функціонального призначення;
- зберігання виробів у заданому стані протягом певних термінів;
- перевезення або переміщення виробів з використанням транспортних засобів.

На стадії «Виведення з експлуатації» морально й фізично застарілі вузли МС і мехатронні системи в цілому виводять з експлуатації й утилізують.

3.2. Основні технічні характеристики мехатронних систем

Будь-яка мехатронна система визначається своїми якостями, властивостями, а також відмітними рисами, опис яких і є характеристиками системи. Усі характеристики системи можна умовно поділити на чотири класи: функціональні, експлуатаційні, економічні й технічні (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Клас характеристик	Характеристика
Функціональні	Призначення, повнота можливостей, універсальність
Експлуатаційні	Надійність, живучість, безпечність, ергономічність (забезпечення фізіологічних зручностей для людини й створення умов для її психологічного комфорту)
Економічні	Вартість, терміни окупності, рентабельність
Технічні	Спектри сигналів, заводостійкість, ефективність передачі інформації, швидкодія, енергопостачання (потужність, напруга, частота), елементна база, вимоги до зберігання, транспортування, умови, за яких система виконує свої основні функції: кліматичні (температура, вологість, тиск тощо); механічні впливи (вібрація, трясіння, перенесення, удари тощо); наявність завод та ін.

Усі властивості, якості, відмітні риси системи визначаються її функціональним призначенням, повнотою можливостей, універсальністю. У паспорті на систему зазвичай наводять:

- перелік режимів роботи системи (автоматичний, напівавтоматичний, ручний, контрольний тощо);
- тип об'єкта, для якого призначено мехатронну систему;
- характер роботи системи (безперервний, циклічний, одноразової дії тощо);
- інтенсивність і склад інформаційних потоків (кількість обслуговуваних об'єктів, процесів, склад інформації про кожну точку об'єкта, процесу тощо);
- додаткові функції системи (реєстрація необхідної інформації, сигналізація про несправності, контроль самої системи та ін.).

Під повнотою можливостей розуміється відношення обсягу перевірок різних приладів, підсистем, пристроїв об'єкта однією системою контролю й керування до загального обсягу перевірок.

Під універсальністю розуміється можливість використання однієї і тієї самої системи контролю й керування для різних комплексів при незначних доробках системи. Експлуатаційними характеристиками систем є надійність, живучість, безпечність, ергономічність.

Надійність, живучість і безпечність є системними властивостями. При визначенні цих понять використовуються такі поняття, як: справність, працездатність, дефект, відмова та ін.

Технічний стан об'єкта або системи визначається сукупністю параметрів, що можуть змінюватися. Межі їх змінено встановлено в нормативно-технічній документації (НТД). Параметр (а в цілому об'єкт,

система, прилад, пристрій тощо) має відповідати вимогам НТД, у разі невідповідності кожний такий випадок є дефектом [15].

Дефекти можуть бути наслідком природних процесів зношення і старіння, пошкодження, порушення правил і норм експлуатації, а також такими, які допущено під час розроблення, виробництва й ремонту.

Параметри можуть бути основними й другорядними. Основні (робочі) визначають режими роботи об'єкта або системи, другорядні — роботу об'єкта (системи) у допоміжних режимах.

Усі стани системи поділимо на три множини (рис. 3.2):

- $S_{ппс}$ — множина повністю працездатних станів об'єкта;
- $S_{чпс}$ — множина частково працездатних станів об'єкта;
- $S_{нпс}$ — множина непрацездатних станів об'єкта.

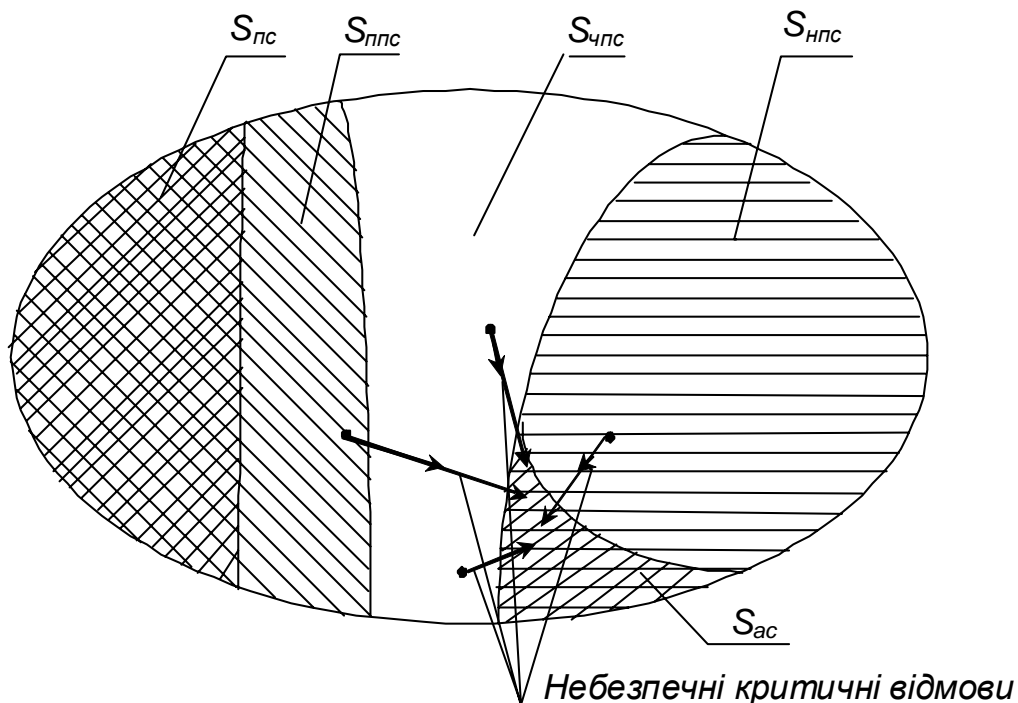


Рис. 3.2. Стани мехатронної системи

У множині повністю працездатних станів ($S_{ппс}$) виділимо підмножину справних станів $S_{сс}(S_{сс} \subseteq S_{ппс})$, а в множині непрацездатних станів ($S_{нпс}$) — підмножину аварійних станів $S_{ас}(S_{ас} \subseteq S_{нпс})$.

Справний стан ($S_{сс}$) — це такий стан системи, при якому її основні й другорядні параметри відповідають усім вимогам НТД, крім того, у її резервній апаратурі (у резервних вузлах, агрегатах) немає дефектів. Звідси випливає, що справна система може виконувати задані функції в усіх режимах роботи.

Працездатний стан ($S_{ппс}$) — це такий стан системи, при якому її основні параметри знаходяться у межах, установлених НТД, при цьому другорядні параметри можуть бути або в межах норм, або поза ними.

Несправний стан — це такий стан системи, при якому хоча б один параметр не відповідає вимогам НТД. Звідси випливає, що несправна система може бути працездатною, якщо вимогам НТД відповідають основні параметри і не відповідає хоча б один другорядний. Несправна система може бути й непрацездатною, якщо вимогам не відповідає хоча б один основний параметр, а другорядні параметри можуть як відповідати, так і не відповідати вимогам НТД.

Часто під час контролю й перевірки апаратури використовується частково справна апаратура, яка відповідає частково працездатним станам системи ($S_{чпс}$). Під цим розуміється, що система може виконувати функції в основних і допоміжних режимах, при цьому деякі параметри відповідають вимогам НТД.

Відмовою називають подію, яка полягає у втраті системою працездатності. У цьому випадку хоча б один із основних параметрів виходить за межі встановленого допуску.

З основних параметрів системи виділимо такі, невідповідність яких вимогам НТД призводить до аварійних станів системи ($S_{ас}$).

Надійність — властивість системи зберігати у часі й установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують її здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах роботи й умовах застосування [16].

З означення випливає, що надійність характеризується здатністю системи знаходитись у робочому стані (див. рис. 3.2, область $S_{ппс}$) протягом заданого часу й на заданих умовах застосування.

Мехатронна система зазвичай може функціонувати в умовах або непередбачених, або важкопрогнозованих впливів. Тому їй має бути властива живучість, яка у найзагальніших рисах полягає у зберіганні хоча б часткової працездатності.

Живучість — властивість системи зберігати й автоматично відновлювати повністю або частково працездатний стан при виникненні в ній відмов, спричинених у тому числі екстремальними (непередбаченими або важкопрогнозованими) впливами.

Безпечність системи полягає в її здатності протистояти переходу до множини аварійних станів (рис. 3.2, $S_{ас}$). Очевидно, що аварійним є такий стан, у якому подальше застосування системи за призначенням є недопустимим, бо це може бути небезпечним для обслуговування персоналу й навколишнього середовища.

Персонал є головним елементом при обслуговуванні мехатронних систем і виконує найважливіші функції в системі:

— приймає остаточне рішення про стан об'єкта або вузлів мехатронної системи;

- залежно від стану приймає рішення про порядок наступних дій;
- розробляє різні варіанти порядку дій залежно від можливих станів об'єкта керування або системи.

Наявність у колі контролю й керування мехатронної системи обслугового персоналу потребує узгодження характеристик системи й людини (ергономічні вимоги), а саме:

- забезпечення фізіологічних зручностей для роботи обслугового персоналу;
- створення умов для психологічного комфорту обслугового персоналу (тобто повна доступність для розуміння персоналом цієї інформації про об'єкт і систему; наявність розвинутих засобів навчання, інструктування і тренувань тощо).

З економічних характеристик розглянемо тільки вартість. Вартість системи складається з вартості розроблення, виготовлення, випробувань та експлуатації. Визначення вартості одного комплексу апаратури є досить складним завданням. Відомо тільки, що ця апаратура є дорогою. На всіх етапах її виробництва прагнуть до мінімізації абсолютних витрат.

Між об'єктом і засобами контролю й керування відбувається обмін інформацією при дії завад. Тому дуже важливо знати ступінь відповідності (достовірності) прийнятої інформації переданій, який називають завадостійкістю системи, тобто завадостійкість — це здатність системи протистояти шкідливій дії завад, унаслідок яких прийнята інформація буде якоюсь мірою відрізнитися від переданої.

Для передачі інформації важливо знати не тільки ступінь її достовірності, але й час, витрачений на передачу й оброблення. Цей час залежить від ефективності каналів передачі і швидкодії всієї системи.

Ефективність каналів передачі — це їхня здатність забезпечити передання, приймання, оброблення, перетворення й подання заданої кількості інформації найбільш економічним способом.

Швидкодія системи визначається тривалістю реакції системи на збурення середовища на об'єкті контролю й керування, це — відрізок часу t_w від моменту виникнення збурення середовища на об'єкті до моменту виконання керувальної дії:

$$t_w = t_3 + t_k + t_o + t_B + t_{K33} + t_{\Gamma}, \quad (3.1)$$

де t_3 — час збору інформації про поточний стан об'єкта;

t_k — час передачі повідомлення про поточний стан об'єкта

t_o — час оброблення поточного стану (тобто порівняння поточного стану з бажаним на певний момент);

t_B — час вироблення (формування) керувального (або стимулювального) впливу;

$t_{кзз}$ — час передачі керувального (або стимулювального) впливу через канал зворотного зв'язку;

$t_{п}$ — час дії виконавчого пристрою (час перехідних процесів).

Кожна зі складових $t_{ш}$ залежить від багатьох факторів і насамперед від виду сигналів, які циркулюють в об'єкті й засобах контролю й керування, швидкості оброблення інформації в окремих пристроях і системах в цілому, елементної бази, на якій побудовано апаратуру, завадостійкості й ефективності передачі інформації.

Кожна з розглянутих характеристик системи не є ізольованою, автономною, усі є взаємопов'язаними. У реальних умовах (при проектуванні, виробництві, випробуваннях, експлуатації) їх необхідно розглядати комплексно.

3.3. Експлуатаційні властивості мехатронних систем

Ефективність застосування мехатронних систем (МС) істотно залежить від їхніх експлуатаційних властивостей, що закладаються на етапах розроблення й виготовлення. До основних з них належать надійність, готовність, експлуатаційна технологічність, економічність, живучість. Розглянемо кожну з цих властивостей і оцінімо ступінь їх впливу на ефективність експлуатації.

Надійність — це властивість мехатронної системи (об'єкта) виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників у заданих межах, що відповідають заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, ремонту, зберігання і транспортування [11].

Тут і надалі під об'єктом розуміють будь-яку мехатронну систему або її частину, прилади, окремі деталі. Від надійності, що є однією із найважливіших експлуатаційних властивостей МС, значно залежать ефективність застосування МС за призначенням, економічні витрати на експлуатацію і ремонт. Необхідний рівень надійності багато в чому визначає й вартість виготовлення МС.

Надійність є комплексною властивістю. Залежно від призначення об'єкта й умов його експлуатації надійність може мати такі властивості, як безвідмовність, збережуваність, ремонтпридатність і довговічність кожну окремо або певне їх поєднання. Наприклад, для об'єкта, що не ремонтується і який не призначено для зберігання, надійність визначатиметься його збережуваністю під час транспортування й безвідмовністю при використанні за призначенням. Для ремонтваних об'єктів в період експлуатації однією із найважливіших властивостей, що забезпечують надійність, може бути ремонтпридатність.

Безвідмовність — властивість об'єкта зберігати працездатність упродовж деякого часу або напрацювання. При цьому під працездатністю

(працездатним станом) розуміють такий стан об'єкта (МС), при якому він здатний виконувати задані функції, зберігаючи значення заданих параметрів у межах, установлених нормативно-технічною документацією. Якщо ж значення хоча б одного заданого параметра, що характеризує здатність об'єкта виконувати задані функції, не відповідає встановленим вимогам, то об'єкт перебуває в непрацездатному стані.

До параметрів, що визначають здатність МС виконувати задані функції, належать її тактико-технічні й експлуатаційно-технічні характеристики (точність позиціонування, чутливість датчиків, пропускну спроможність каналів передачі інформації, швидкість руху приводів, точність вимірювання параметрів руху об'єкта та ін.). Відхилення будь-якого з цих параметрів від заданого значення може призвести до невиконання завдань керованим об'єктом, тобто до відмови.

Ширшим поняттям, що характеризує технічний стан МС, є поняття справності, або справного стану. Під справним станом (справністю) розуміють такий стан, при якому МС відповідає усім вимогам, установленим у нормативно-технічній документації.

З цього означення видно, що поняття справності є ширшим, ніж поняття працездатності, оскільки МС вважається працездатною у тому випадку, якщо задовольняє лише тим вимогам, які забезпечують виконання системою заданих функцій. Отже, працездатна МС може бути й несправною, якщо не задовольняє тим вимогам, які не впливають на якість її функціонування під час застосування за призначенням, наприклад вимогам до зовнішнього вигляду (порушені декоративні покриття). Якщо МС не відповідає хоча б одній із вимог, установлених в нормативно-технічній документації, то її вважають несправною.

Під час експлуатації МС можна транспортувати, а також зберігати іноді впродовж тривалого часу. Під час транспортування, як і під час зберігання, на МС впливають різні несприятливі чинники (механічні навантаження, зовнішнє середовище та ін.), які призводять до погіршення надійності, зниження показників безвідмовності й довговічності. Погіршення надійності може виявитися або безпосередньо при транспортуванні чи зберіганні, або при подальшій експлуатації. Тому на етапі розроблення й виробництва МС важливо надати їй такі властивості, щоб вона могла протистояти шкідливим діям руйнівних чинників при транспортуванні й зберіганні. Під час експлуатації завдання зводиться до створення й підтримки відповідних умов транспортування й зберігання.

Властивість мехатронної системи безперервно зберігати справний і працездатний стан протягом і після зберігання або транспортування має назву *збережуваності*.

Під *ремонтпридатністю* розуміють властивість МС, що є характеристикою міри її пристосованості до попередження й виявлення причин виникнення відмов, ушкоджень та усунення їх наслідків шляхом ремонту й технічного обслуговування.

Довговічність — це властивість МС зберігати робоздатність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування й ремонту. Граничним станом називають такий стан об'єкта, при якому його подальшу експлуатацію необхідно припинити через наявність однієї або декількох причин: неусувного порушення вимог безпеки; неусувного виходу заданих параметрів за встановлені межі; неусувного зниження ефективності експлуатації нижче за допустиму; необхідності проведення середнього або капітального ремонту тощо.

Ознаки граничного стану встановлюються за нормативно-технічною документацією. Співвідношення між складовими надійності наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Властивості надійності мехатронних систем	Необхідність для системи		Етап забезпечення		
	тривалого застосування (відновлюваної МС)	одноразового застосування (невідновлюваної МС)	розроблення й виробництва елементної бази	розроблення й виробництва вузлів МС	експлуатації МС
Безвідмовність	+	+	+	+	+
Збережуваність	+	+	+	+	+
Ремонтопридатність	+	—	—	+	+
Довговічність	+	—	—	+	+

З табл. 3.2 видно, що надійність МС (головним чином, завдяки властивості безвідмовності й збережуваності) об'єктивно створюється під час розроблення й виробництва. Завдяки технічному обслуговуванню й ремонту забезпечується підтримка закладеного рівня надійності під час експлуатації.

Готовність — це властивість МС, яка є характеристикою її пристосованості до переходу з будь-якого вихідного стану до стану застосування за призначенням. Готовність МС залежить від таких властивостей, як безвідмовність, ремонтпридатність, експлуатаційна технологічність та ін. Засоби МС з вищою експлуатаційною технологічністю і надійністю за інших рівних умов мають і вищу готовність.

Під *експлуатаційною технологічністю* розуміється міра пристосованості МС до проведення заходів з підготовки її до застосування, контролю технічного стану, технічного обслуговування й ремонту. Іноді цю властивість поділяють на дві складові [21, 28]: технологічність обслуговування (пристосованість МС до проведення підготовчих операцій,

технічного обслуговування й ремонту) і технологічність застосування (узгодженість машини й оператора).

МС з одного ступеня готовності до іншого переводить обслуговий персонал. Тому показники готовності істотно залежать від кваліфікації обслугового персоналу. Постійне вдосконалення готовності — одне з найважливіших завдань інженерно-технічних кадрів підприємств.

Експлуатаційна технологічність залежить від зручності доступу до місць контролю роботоздатності, рівня автоматизації операцій з підготовки МС до застосування, зручності доступу до елементів МС під час технічного обслуговування й ремонту, від рівня автоматизації робіт з пошуку несправностей і т. ін. Зі свого боку, за експлуатаційною технологічністю визначаються трудовитрати на проведення технічного обслуговування, ремонтів та інших експлуатаційних заходів.

Під *живучістю* мехатронної системи розуміють її надійність в умовах руйнівних дій [16, 21].

Економічність — це властивість, що є характеристикою витрат, пов'язаних з експлуатацією МС (застосуванням за призначенням, технічним обслуговуванням, ремонтом і т. ін. Сукупність експлуатаційних властивостей МС утворює її експлуатаційну якість.

Експлуатаційно-технічні характеристики (ЕТХ), або експлуатаційні показники, є кількісним вираженням однієї або декількох експлуатаційних властивостей. Таким чином, склад ЕТХ визначають за показниками надійності, готовності, експлуатаційної технологічності, економічності й живучості.

Показники, які використовують для кількісного оцінювання експлуатаційних властивостей, можна об'єднати в такі групи: часові, імовірнісні й вартісні. Часові показники використовують для кількісного оцінювання тривалості того чи іншого процесу, наприклад часу безвідмовної роботи, часу підготовки МС до застосування, часу відновлення роботоздатності, тривалості технічного обслуговування і т. ін.

З досвіду експлуатації випливає, що МС функціонують в умовах дії великої кількості випадкових чинників, основними з яких є коливання параметрів зовнішнього середовища (температури, вологості, тиску і т. ін.), природні й штучні перешкоди, похибки вимірювальних приладів, випадкові відмови апаратних засобів, помилки в керувальній інформації тощо. З цього випливає, що всі часові характеристики мають випадковий характер, тому як експлуатаційні показники використовують їхні середні значення або математичні сподівання.

Числове значення будь-якого часового показника визначається сумарними витратами часу на виконання всіх операцій певного експлуатаційного процесу (технічного обслуговування, підготовки до застосування й т. ін.) або тривалістю фізичного процесу під час експлуатації МС (часу безвідмовної роботи та ін.).

Знання часових показників дає змогу оптимізувати певний процес шляхом виявлення й використання резервів сил і засобів на тій чи іншій операції цього технологічного процесу або шляхом утворення оптимальних умов експлуатації і різних видів надмірності для збільшення, наприклад, часу безвідмовної роботи.

Імовірнісні показники використовують для оцінювання ймовірності здійснення тієї чи іншої бажаної події, наприклад ймовірності виконання усіх завдань сеансу зв'язку з керованим об'єктом; безвідмовної роботи МС упродовж заданого часу й т. ін. Під час експлуатації МС у більшості випадків трапляються випадкові події і випадкові процеси. Тому групу ймовірнісних показників широко застосовують як для апріорного оцінювання можливості отримання бажаного результату, так і для апостеріорного оцінювання якості експлуатації.

Імовірнісні показники дають змогу визначати необхідний склад засобів МС з урахуванням їхніх експлуатаційних властивостей (зокрема, надійності) для отримання бажаного результату із заданою ймовірністю.

Вартісні показники призначено для оцінювання грошових або трудових витрат на ті чи інші заходи й роботи, що виконує обслуговий персонал під час експлуатації (наприклад, оцінювання вартості технічного обслуговування, трудомісткості ремонту та ін.). Знання реальних витрат, пов'язаних з експлуатацією МС, дає змогу вирішувати завдання з оптимізації системи експлуатації за вартісними критеріями, пошуку економічніших способів і методів організації і виконання різних робіт під час технічного обслуговування, ремонту, зберігання тощо.

Кожна з числових характеристик, яку використовують для оцінювання експлуатаційних властивостей, має задовольняти таким вимогам: бути величиною, що залежить від процесу функціонування системи; давати наочне уявлення про одну або декілька експлуатаційних властивостей систем; допускати в межах можливого просту наближену оцінку показника за експериментальними даними, отриманими під час експлуатації або випробовувань.

Наведемо кілька основних експлуатаційних показників [14,15, 21].

Показники надійності (безвідмовності, збережуваності, ремонтпридатності, довговічності). Перші два показники використовують переважно для оцінювання безвідмовності невідновлюваних систем. Проте їх можна застосовувати для оцінювання безвідмовності відновлюваних систем до виникнення першої відмови. Інші два показники використовують тільки для оцінювання безвідмовності відновлюваних систем.

До показників безвідмовності належать ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, середній час напрацювання до відмови T_{cp} , інтенсивність відмов $\lambda(t)$, параметр потоку відмов $\omega(t)$, час напрацювання на відмову T_0 . До показників збережуваності належать гамма-процентний і середній терміни збережуваності.

До показників ремонтпридатності належать: імовірність відновлення в заданий час $P_e(t)$; середній час відновлення T_e ; інтенсивність відновлення μ . До показників довговічності належать: ресурс (середній, призначений, до списання, між середніми або капітальними ремонтами, до середнього або капітального ремонту, гамма-процентний), термін експлуатації (середній, між середнім і капітальним ремонтом, до середнього або капітального ремонту, до списання, гамма-процентний).

Показники готовності. До них належать: коефіцієнт готовності K_G ; коефіцієнт простою K_P ; коефіцієнт технічного використання K_T ; коефіцієнт оперативної готовності $K_{O.G}$.

Показники експлуатаційної технологічності. Такими показниками можуть бути функція технологічності обслуговування та окремі коефіцієнти, які характеризують пристосовність МС до проведення тих чи інших робіт під час експлуатації (коефіцієнти ремонтпридатності, профілактопридатності, витрат праці, основних робіт та ін.).

Показники економічності. До цих показників належать вартість експлуатації (сумарна, середня); вартість технічного обслуговування (сумарна, середня, питома); вартість ремонту (сумарна, середня, питома); трудомісткість технічного обслуговування (сумарна, середня, питома); трудомісткість ремонту (сумарна, середня, питома).

Експлуатаційні показники мають важливе значення в практиці експлуатації МС і дають змогу робити інженерний розрахунок якості експлуатації, вирішувати завдання оптимізації системи експлуатації за часовими, імовірнісними або вартісними критеріями, ставити обґрунтовані вимоги щодо надійності, готовності, експлуатаційної технологічності до створюваних МС, урахувати вплив експлуатаційних властивостей на якість виконання заданих функцій.

Експлуатаційні показники дають змогу порівняно оцінювати МС за їхніми експлуатаційними властивостями, а також планувати експлуатацію і обґрунтовувати норми постачання запасними елементами.

Завдання інженерів, що експлуатують МС, полягає в систематичному, якісному й повному зборі, обробленні й аналізі статистичних даних, що характеризують процес експлуатації, і розробленні на цій основі заходів з підвищення надійності й готовності мехатронних систем і комплексів.

3.4. Класифікація мехатронних систем

Для класифікації систем можна взяти такі основні ознаки: ступінь впливу відмов на працездатність МС; особливість функціонування МС у період застосування за призначенням; пристосовність МС до відновлення працездатності й технічного обслуговування. Виходячи з цих ознак, усі МС можна поділити на кілька класів (рис. 3.3).

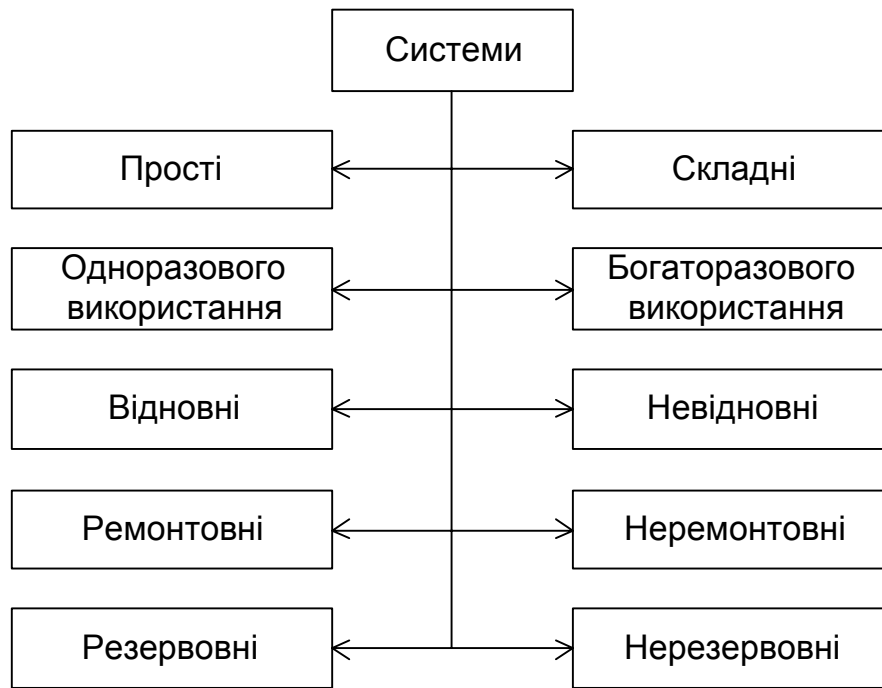


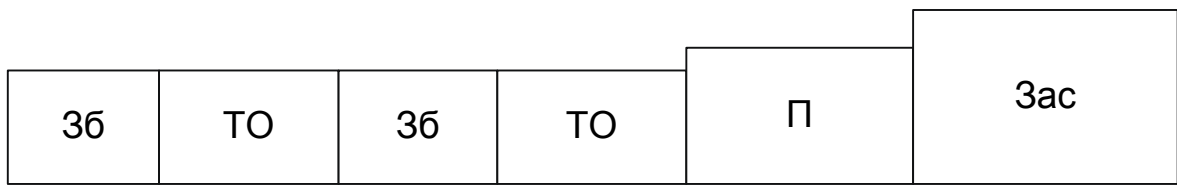
Рис. 3.3. Класифікація мехатронних систем

Прості системи — системи, для яких характерними є два можливих стани: працездатний і непрацездатний. Для таких систем має бути чітке означення поняття відмови. У найпростішому випадку в цій системі відмова настає при виході з ладу одного елемента.

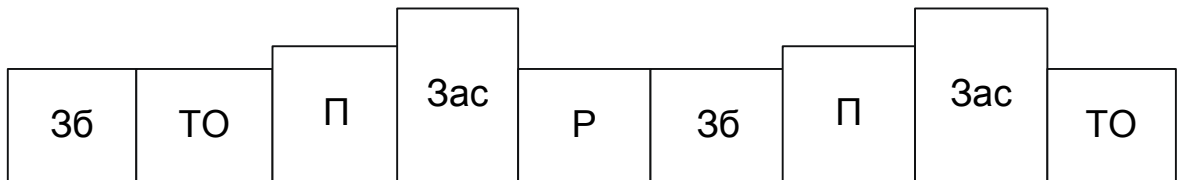
Складні системи — системи, що мають таку структуру і такі функціональні зв'язки, знаючи які, можна точно визначити рівень їх відмови. У складній системі відмова елемента або навіть групи елементів не призводить до відмови системи в цілому, а лише зменшує її ефективність. Наприклад, у багатоканальних системах контролю й керування відмова кількох каналів не призводить до повної втрати роботоздатності, а лише деякою мірою зменшує пропускну здатність.

Системи одноразового (разового) застосування — це системи, повторне застосування яких є неможливим або недоцільним. Це пов'язано з тим, що після першого циклу застосування апаратура або руйнується, або відпрацьовує призначений ресурс. Мехатронна система, що під час експлуатації відпрацьовувала призначений ресурс, не відновлюється (рис. 3.4, а).

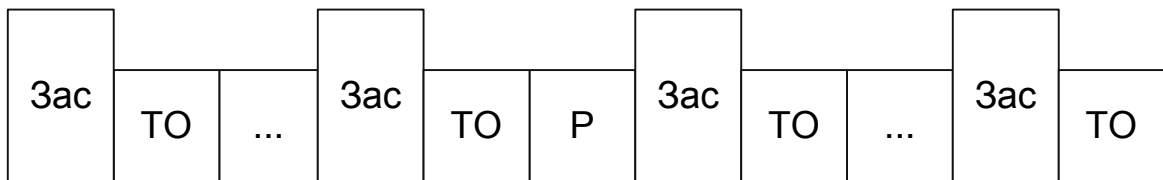
До систем цього класу належать, наприклад, бортова радіотехнічна апаратура ракет, метеорологічних шарів-зондів, хімічні датчики та ін. Для систем одноразового застосування характерним є тривалий етап зберігання, після якого починаються етапи технічного обслуговування, підготовки до застосування й застосування за призначенням. Під час зберігання апаратури здійснюють періодичні перевірки (контроль технічного стану) і технічне обслуговування.



а



б



в

Рис. 3.4. Етапи експлуатації мехатронних систем різного застосування:
а — одноразового; б — багаторазового, в — безперервного

До систем багаторазового застосування належать МС, повторне використання яких є можливим і здійснюється після виконання системою своїх функцій за попередній цикл застосування. Для МС багаторазового застосування характерним є чергування етапів зберігання, технічного обслуговування, ремонтів, чергування й застосування за призначенням (рис. 3.4, б). Прикладом систем багаторазового застосування можуть бути оброблювальні центри, модулі транспортування, робототехніки, складання та ін.

В окремому випадку для певного класу систем багаторазового застосування характерним є перебування їх у режимі застосування за призначенням протягом досить тривалого часу. При виникненні відмови на таких системах проводять роботи з відновлення працездатності, і потім їх знову переводять у стан застосування за призначенням. Крім того, невеликі перерви в їх роботі плануються для технічного обслуговування. Такі системи називають умовно системами безперервного застосування (рис. 3.4, в). Прикладами систем безперервного застосування можуть бути

радіорелейні станції, радіомаяки, радіоприймачі, що працюють в режимі тривалого чергового прийому, лінії електроживлення та ін.

Відновними називають такі системи, роботоздатність яких у разі виникнення відмови підлягає відновленню, в іншому випадку їх відносять до класу невідновних систем. Залежно від пристосованості системи до ремонту вводять поняття системи, що підлягає ремонту (*ремонтвовної*) і не підлягає (*неремонтвовної*). Ремонтвовними системами називають такі, справність і роботоздатність яких у разі виникнення відмови або пошкодження можна відновити, в іншому випадку їх відносять до неремонтвовних.

З наведених означень випливає, що поняття «відновна система» і «невідновна система» не заміняють терміни «ремонтвовна система» і «неремонтвовна система», оскільки ці терміни характеризують певну експлуатаційну властивість систем (їх пристосованість до ремонту), а перші — умови відновлення роботоздатності в конкретній ситуації, що складається під час експлуатації (зокрема, на етапі застосування МС за призначенням).

Якщо відновити роботоздатність МС у разі відмови з яких-небудь причин неможливо (наприклад, короткочасність або неповторність процесу керування), то така МС у цій ситуації є невідновною. Якщо ж переривання процесу керування на час відновлення роботоздатності не призведе до зриву поставленого завдання, то в такій ситуації МС є відновною.

Отже, одна й та сама система залежно від особливостей і етапів експлуатації може бути як відновною, так і невідновною. Неремонтвовні системи зазвичай одночасно є й невідновними.

Резервовні системи — це системи зі структурною надмірністю. Резервування є одним із найпоширеніших способів підвищення надійності МС. Системи, які не мають структурної надмірності, називають нерезервовними.

Під час експлуатації МС може переходити зі справного або працездатного стану до несправного або непрацездатного. Причинами таких переходів є пошкодження або відмови, що виникають під час експлуатації МС. Пошкодженням називають подію, що полягає у порушенні справності МС або її складових частин (окремих вузлів) унаслідок дії зовнішніх впливів, що перевищують рівні, установлені в нормативно-технічній документації на МС.

Пошкодження може бути суттєвим і несуттєвим. Суттєве пошкодження — це порушення працездатності, тобто відмова, несуттєве — порушення тільки справності при збереженні працездатності. Однак слід мати на увазі, що під час експлуатації деякі несуттєві пошкодження з часом можуть стати істотними і тим самим призвести до відмови мехатронної системи.

Відмовою називають подію, що полягає в порушенні роботоздатності МС. Розглядаючи поняття відмови, слід мати на увазі, що в системах

людина—машина, до класу яких належать МС, відмови можуть бути і не пов'язані з пошкодженням технічних пристроїв (машинної частини системи). Деякі відмови такої системи пов'язані з помилками, яких припускаються оператори при виконанні тих чи інших дій. Наприклад, помилкова установка оператором органів керування, неправильне введення вихідних даних до обчислювального пристрою та ін.

Відмови, що виникають унаслідок порушення правил і норм експлуатації (експлуатаційні відмови), при оцінюванні надійності МС зазвичай не враховують. Їх враховують тільки при оцінюванні надійності системи людина—машина в цілому.

Розглянемо основні класи відмов залежно від закономірностей їх виявлення й причин виникнення. За характером змінення параметра до моменту виникнення відмови їх поділяють на раптові й поступові.

Раптова відмова характеризується стрибкоподібним зміненням одного або декількох заданих параметрів, що визначають працездатність, є подією випадковою і не піддається точному передбаченню. У зв'язку з цим час безвідмовної роботи МС стає величиною випадковою.

Поступова відмова характеризується поступовим зміненням одного або декількох заданих параметрів МС. Тому під час експлуатації можна встановити закономірність змінення параметрів, що призводять до поступової відмови, і використовувати цю закономірність для прогнозування моменту початку відмови.

За ступенем зв'язку з іншими відмовами в мехатронних системах можуть виникати незалежні й залежні відмови.

Незалежна відмова — це відмова елемента системи, яка не обумовлена пошкодженням або відмовою інших її елементів.

Залежною відмовою називають таку відмову елемента системи, яка обумовлена пошкодженням або відмовою іншого елемента системи. Залежні відмови часто виникають унаслідок перевантажень та інших впливів, пов'язаних з виходом з ладу взаємозалежних елементів. Більшість відмов у МС є залежними, що ускладнює точний розрахунок показників надійності.

Залежно від характеру вияву відмови поділяються на збої і переміжні відмови. *Збій* являє собою відмову із самоусуненням, що призводить до короткочасного порушення працездатності (наприклад, короткочасна втрата зв'язку з об'єктом через завмирання радіосигналу).

Переміжна відмова — багаторазове виникнення збою одного і того ж характеру.

За ступенем впливу на роботоздатність відмови можуть бути повними й частковими.

Повна відмова призводить до повної втрати роботоздатності. Такі відмови є характерними для простих систем.

Часткова відмова — це така відмова, після виникнення якої систему можна використовувати за призначенням, але з меншою ефективністю.

Відмови такого виду мають місце в складних багатофункціональних (багатоканальних) МС.

За наявністю зовнішніх ознак розрізняють явні (очевидні) і неявні (приховані) відмови.

Явна відмова — це відмова (наприклад, відсутність напруги в лампі при перегорянні волоска розжарення), яка виявляється відразу після її виникнення без застосування додаткових вимірювальних приладів і здійснення вимірювань.

Неявна відмова — це відмова, яка не має зовнішніх ознак вияву, її можна виявити тільки з допомогою відповідних вимірювань або випробувань. Цей вид відмов є найбільш небезпечним, оскільки може створити видимість роботоздатного стану за наявності прихованих дефектів і призвести до зриву виконання завдання. Наприклад, деяка втрата чутливості пристрою вимірювання параметрів руху об'єктів при роботі вузлів МС на малих відстанях може зовсім не виявлятися, оскільки не буде забезпечуватися необхідне відношення потужності сигналу до потужності шуму. При роботі на граничних відстанях будуть виникати похибки вимірювання вищі від допустимих, що слід розглядати як порушення роботоздатності, тобто виникнення відмови.

Залежно від причини виникнення розрізняють відмови конструкційні, виробничі й експлуатаційні.

Конструкційні відмови виникають через порушення встановлених правил і норм конструювання. Інакше кажучи, це відмови, що виникають унаслідок помилок, яких припустилися при конструюванні системи. Прикладом таких помилок може бути невдале розташування елементів і пристроїв у блоках апаратури без урахування їх взаємного впливу (теплових режимів, електромагнітних полів і т. ін.).

Виробничі відмови виникають через порушення встановленого процесу виготовлення й ремонту МС. Основними причинами виробничих відмов є недостатня якість застосованих вихідних матеріалів, низька якість виконання технологічних операцій, помилки при виконанні складальних і монтажних робіт (наприклад, обриви проводів, зруйнування паяних з'єднань у блоках і пристроях через порушення технології паяння елементів).

Експлуатаційні відмови виникають унаслідок порушення встановлених правил та умов експлуатації (наприклад, неправильне установлення органів регулювання, вплив фізичних факторів зовнішнього середовища і внутрішніх факторів системи, пов'язаних з енергетичним режимом системи).

З аналізу досвіду експлуатації мехатронних систем [9] випливає, що в дослідних зразках відмови за наведеними групами розподіляються приблизно таким чином: конструкційні — 33 %, виробничі — 30 %, експлуатаційні — 9 % відмови через недостатню якість комплектувальних елементів — 28 % [21, 27–29].

Контрольні запитання

1. Що називають експлуатацією?
2. Назвіть стадії життєвого циклу мехатронних систем.
3. Які функціональні характеристики використовуються в мехатронних системах?
4. Назвіть експлуатаційні властивості мехатронних систем.
5. Обґрунтуйте склад експлуатаційно-технічних характеристик.
6. Дайте означення складових надійності.
7. Назвіть комплексні показники надійності.
8. Наведіть приклади складних мехатронних систем.
9. Дайте означення безвідмовності й збережуваності.

4. ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ГОТОВНІСТЬ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

4.1. Об'єктивні фактори впливу на готовність мехатронних систем

Об'єктивні фактори впливають на готовність МС через змінення надійності їх елементів і вузлів. Розглянемо найбільш суттєві з них.

Вологість і забрудненість навколишнього середовища. Вологість є одним із найбільш агресивних факторів, що впливають на готовність МС [28, 32]. Для кількісного оцінювання водяної пари, що міститься в повітрі, використовують поняття відносної вологості.

Під відотною вологістю розуміють відношення кількості водяної пари, яка міститься в повітрі, до її найбільшої кількості, що відповідає стану насичення за певної температури.

Вологість повітря в насиченому стані береться за 100 %. Відносна вологість виражається у відсотках [32]. Нормальним вважається значення відносної вологості 60–70 %. При відносній вологості 40 % повітря вважається сухим, а при 80 % — сирым. Підвищена вологість призводить до виникнення таких небажаних явищ, як корозія металів, зруйнування органічних матеріалів, погіршення електричних характеристик діелектриків, змінення деяких параметрів вузлів МС. При добових коливаннях температури в апаратурі частково конденсується волога, що погіршує умови її роботи. Волога заповнює всі тріщини в ізоляторах і покриттях, порушує структурні властивості магнітних носіїв інформації, зменшує стабільність генераторів, що призводить до загального порушення роботи апаратури.

Крім того, волога, яка знаходиться на поверхні апаратури, проникає в середину матеріалу через його пори. Спроможність матеріалів поглинати вологу прийнято характеризувати приростом ваги матеріалу. Приріст ваги

зазвичай виражається у відсотках і береться за 24 години [29]. Вплив вологості позначається на прискоренні руйнування лакофарбових захисних покриттів, порушенні герметизації і заливок. Шкідливий вплив вологості зазнають органічні ізоляційні матеріали. Сконденсована волога змінює механічні й електричні властивості діелектриків, унаслідок чого підвищується небезпека наскрізного пробоя і діелектричні втрати.

Велику групу елементів вузлів мехатронних систем утворюють діелектрики, які погано вбирають вологу (скло, кераміка, порцеляна та ін.). Через підвищену вологість на поверхні цих матеріалів утворюється іонізована плівка, яка проводить струм. Наявність іонізованої плівки зменшує поверхневий опір і підвищує небезпеку поверхневого пробоя.

Надмірна вологість дуже впливає на параметри окремих деталей. Наприклад, збільшуються ємність конденсаторів і струм розряду, зменшується їхня електрична міцність. У негерметичних конденсаторах струм розряду збільшується через зменшення опору ізоляції. Струм розряду у загерметизованих конденсаторах збільшується через зменшення поверхневого опору між выводами.

Під впливом вологи погіршуються параметри інтегральних мікросхем, трансформаторів, дроселів і котушок індуктивності. Це виявляється у збільшенні значень паразитних ємностей, діелектричних втрат, зниженні добротності котушок індуктивності, зменшенні опору ізоляції обмоток.

У резисторах підвищена вологість руйнує структуру провідного шару, збільшує опір низькоомних резисторів. Виникнення на поверхні високоомних резисторів провідної плівки, навпаки, зменшує величину їхнього опору. Через окиснення провідника у дротяних резисторах зменшується переріз провідника, що призводить до збільшення опору. Конденсація вологи на монтажних платах призводить до виникнення небажаних зв'язків між незалежними інтегральними схемами, що спричиняє ненадійну роботу блоків і приладів МС. Крім того, підвищена вологість негативно впливає на доріжки друкованого монтажу, окиснює контакти, зменшуючи опір між выводами, і призводить до корозії металевих частин. Корозія являє собою місцеве руйнування металів унаслідок хімічних реакцій, що відбуваються на їхніх поверхнях. Корозія збільшується при відносній вологості понад 70 %.

Найбільш небезпечним для схемних елементів і приладів МС є окиснення контактів у перехідних роз'ємах, фішках, з'єднувальних колодках та ін. Кількість таких контактів у вузлах МС досягає 10^6 . Через окиснення струмопровідних поверхонь збільшується перехідний опір контактів, унаслідок чого можливе підгоряння контактів в роз'ємах живлення і порушення функціонування інформаційних і керувальних ланцюгів. В електромеханічних приладах корозія спричиняє передчасне зношення третьових поверхонь.

Спроможність металів піддаватися корозії характеризується можливістю проникнення вологи вглиб металу. Швидкість корозії за рік визначається глибиною проникнення і вимірюється в мікронах. При зниженій температурі волога замерзає і покриває кригою зовнішні елементи апаратури, що призводить до зниження якості її роботи, а в деяких випадках — до механічного руйнування. Шкідливо також впливає і надмірно сухе повітря.

Вологість у межах 40 % спричиняє обезводнення матеріалів, унаслідок чого багато матеріалів коробляться і втрачають свою міцність. Крім того, сухе повітря спричиняє накопичення у вузлах МС значних за величиною електричних статичних зарядів, здатних пробити діелектрики й вивести з ладу інтегральні мікросхеми.

На електронні схеми вузлів МС волога небезпечно впливає в поєднанні з іншими факторами. Наявність в повітрі пилу, газів і особливо солі призводить до активізації небажаних електричних процесів. Пил з навколишнього середовища легко проникає всередину блоків і вузлів МС. В електричних полях провідників пил електризується й інтенсивно покриває монтажну поверхню, збільшуючи ємність вузлів МС і міжвиткову ємність котушок індуктивності. Пил на поверхні друкованих схем утворює струмопровідні перемички між провідниками, спричиняючи несправності, які досить важко виявити.

Потрапивши в мастило і на поверхню тертьових деталей, частинки пилу прискорюють зношення цих деталей. В електромеханічних приладах високого класу точності, наприклад в магнітних дисководах, потрапляння частинок пилу, які за своїми розмірами дорівнюють робочим зазорам (близько 30—50 мкм), може призвести до порушення магнітного покриття диску, яке не відновлюється. Відновлення порушеного покриття потребує великих матеріальних затрат і до того ж не може бути зроблено силами обслугового персоналу. Пил органічного походження є гарною поживною середою і посилює вплив біологічних факторів

Температура навколишнього середовища. Вплив температури навколишнього середовища на готовність МС є надзвичайно великим. Особливо шкідливо впливають на роботоздатність апаратури коливання температури [27, 29]. Добові коливання температури в одному місці можуть сягати 40 °С. Більша частина електричної енергії, яку споживають вузли МС, перетворюється на тепло.

Підвищення температури навколишнього середовища у вузлах МС збільшує розкид параметрів інтегральних мікросхем, напівпровідникових та інших елементів. На підвищення температури навколишнього середовища впливають і зовнішні джерела, до яких належать сонячне світло й сторонні джерела тепла, які знаходяться в цехах комп'ютерно-інтегрованого виробництва. Тому для створення нормальних умов експлуатації МС значення температури навколишнього середовища в окремих вузлах нормуються.

Підтримання встановлених значень температури досягається завдяки застосуванню систем охолодження. Перевищення температури навколишнього середовища більше за допустиму величину є найбільш небезпечним фактором, який спричиняє зменшення надійності елементів і вузлів МС. Особливо чутливими до змін температури є інтегральні схеми, транзистори, напівпровідникові діоди, кварци, деякі типи конденсаторів і резисторів та інші елементи.

Так, в напівпровідникових діодах під дією температури змінюються величини допустимої зворотної напруги і максимального випрямленого струму, а в транзисторах, які є основою інтегральних мікросхем, збільшуються зворотний струм колекторного переходу, початковий струм колектора і коефіцієнт підсилення за струмом, а допустима потужність розсіювання на колекторах транзисторів зменшується.

Змінення цих параметрів є причиною виникнення несправностей вузлів МС. Підвищення температури може призвести до електричного пробоя переходів елементів, обриву й замиканню в електричних ланцюгах. Різноманітні типи резисторів піддаються температурним змінам неоднаково, але для всіх типів характерним є зменшення допустимої потужності розсіювання при підвищенні температури.

Під впливом температури змінюються механічні й електричні властивості конденсаторів: розміри обкладок, відстань між ними, електричні й фізичні параметри діелектриків, величини допустимих робочих напруг. Усе це збільшує небезпеку пробоя конденсаторів. Періодичні змінення температури спричиняють механічні пошкодження конденсаторів, через неоднаковість температурних коефіцієнтів лінійного розширення між металевими виводами й матеріалами оболонок. У таких елементах вузлів МС, як трансформатори, дроселі, котушки індуктивності й реле, зі збільшенням температури збільшується опір обмоток. Періодичні змінення температури обмоток трансформаторів і дроселів призводять до порушення ізоляційного покриття проводів і, як наслідок, до міжвиткових замикань.

Перегрівання феритових матеріалів збільшує енергію втрат у магнітопроводах трансформаторів та електричних машин. Нарешті, підвищення температури прискорює фізико-хімічне руйнування матеріалів, змінює структуру діелектриків, спричиняє окиснення й корозію металів [18, 29]. Змінення параметрів елементів вузлів МС під впливом підвищеної температури є наслідком змінення властивостей матеріалів, з яких виготовлено елементи.

Не менш небезпечним для елементів МС є зниження температури [21, 26, 29]. Такі органічні матеріали, як гума, капрон, поліхлорвініл, вінілпласт, пластмаси тощо стають крихкими й при незначних навантаженнях тріскаються і навіть ламаються. Це різко зменшує надійність роботи інформаційних і силових кабелів. При зниженні температури компанди і смоли стискаються і відходять від каркасів і

кожухів елементів. У цьому випадку порушується герметизація і міцність кріплення елементів.

Низька температура послаблює міцність монтажних з'єднань, оскільки порушується зв'язок припою з відповідним матеріалом. При зниженні температури у більшості матеріалів зменшується пластичність, а при досить низьких температурах матеріали стають крихкими. Здатність матеріалу витримувати низькі температури без значного зменшення міцності має назву морозостійкості.

Зміни температури сильно впливають на працездатність електромеханічних приладів. Так, при підвищенні температури через різницю в коефіцієнтах теплового розширення матеріалів ламаються механічні вузли і такі елементи, як потенціометри, перемикачі та ін. Загустіння мастила при низькій температурі ускладнює роботу електродвигунів. Пускові струми при цьому зростають і можуть сягати аварійних значень. Впливу температури піддаються і носії інформації.

При підвищенні температури магнітна стрічка втрачає еластичність і часто рветься, порошок магнітного покриття стає більш твердим, тому швидше зношуються блоки головок, тягові й притискні ролики. Висока температура пошкоджує електрохімічний папір, що призводить до різкого погіршення роботи графобудувачів. Негативний вплив температури на стан і працездатність МС підсилюється, якщо одночасно діють такі фактори, як вологість і забрудненість навколишнього середовища. Змінення температури навколишнього середовища значно впливає на геометричні розміри матеріалів, що часто спричиняє порушення роботоздатності апаратури, при цьому температура більше впливає на метали.

Старіння і зношення. Старіння є природним і незворотним процесом змінення фізико-хімічної структури матеріалів, з яких виготовлено деталі МС. Старіння призводить до небажаних явищ в апаратурі, що негативно впливає на її роботу.

Під час старіння зменшується опір ізоляції проводів, збільшується опір деяких типів резисторів, окиснюються контакти роз'ємів, змінюються параметри інтегральних схем, транзисторів, діодів, а також механічна міцність деяких матеріалів (пластика, гуми, шкіри, дерева) та ін. Швидкість старіння залежить від властивостей самого матеріалу і від зовнішніх факторів. Ця залежність описується таким виразом [26, 27]:

$$\chi = \alpha T^n e^{-\frac{\beta}{T}}, \quad (4.1)$$

де χ — коефіцієнт, яким визначають швидкість старіння матеріалу;
 T — абсолютна температура;

α , β , n — константи, що залежать від типу матеріалу і навколишніх умов.

Необхідно зазначити, що швидкість старіння вузлів МС під час її роботи відрізняється від швидкості старіння під час зберігання. Зношення деталей МС визначається в загальному випадку як комбінація двох видів зношення: механічного й електричного [22, 29].

Механічне зношення є найбільш очевидним і пов'язане зазвичай зі зміненням геометричних розмірів деталей. Його спостерігають, наприклад, при стиранні щіток колекторів двигунів пристроїв введення-виведення інформації, зношенні підшипників, руйнуванні контактних систем перемикачів.

Електричне зношення пов'язане з проходженням електричного струму і з електрохімічними процесами, які при цьому виникають. Електричне зношення виявляється в таких випадках:

— змінення властивостей електроліту електролітичних конденсаторів і виникнені струму розряду;

— змінення структури матеріалу катода електронно-променевої трубки і зменшенні її емісійної спроможності;

— погіршення властивостей електролюмінесцентного покриття електронно-променевих трубок та ін.

Характер вияву електричного зношення можна проілюструвати на прикладі старіння електронно-променевої трубки. Швидкість механічного й електричного зношення залежить від режиму роботи пристроїв, а також від параметрів навколишнього середовища. Велике значення в гальмуванні процесу зношення має своєчасність і якість проведення профілактичних заходів на апаратурі.

Біологічні фактори. Наявність тепла, відповідної вологості, живильного середовища і застою повітря створює сприятливі умови для виникнення й розвитку шкідливих біологічних факторів (грибкових утворень, комах і гризунів).

Грибкові утворення у вигляді плісені найчастіше розвиваються на поверхні органічних матеріалів, які виготовлено з деревини, шкіри, фетру, текстоліту та ін.

Впливу плісені зазнають синтетична й натуральна гума, ебоніт, гетинакс і навіть скло й метал. У місцях утворення плісені нарівні з концентрацією вологи має місце виділення органічних кислот, що спричиняють корозію металів, зменшують електричну міцність і опір діелектриків, руйнують органічні матеріали. За наявності пилу грибкові утворення розвиваються значно швидше.

Деякі типи комах і гризунів можуть псувати кабелі й прилади МС, руйнуючи ізоляційні матеріали, лаковані покриття, знищуючи дерев'яні й пластмасові деталі, прокладки і м'які вставки з бавовняно-паперового матеріалу, гуми й шкіри.

Для боротьби з біологічними шкідниками необхідно застосовувати спеціальні лаковані покриття й уникати застосування матеріалів, що є живильном середовищем для мікроорганізмів.

Атмосферний тиск і сонячна радіація. Атмосферний тиск впливає на роботоздатність вузлів МС. Знижений атмосферний тиск впливає на ізоляційні властивості повітря й умови охолодження приладів МС. Завдяки зниженню тиску зменшується електрична міцність повітря, бо розріджене повітря легше іонізується.

Зменшення коефіцієнта теплоємності повітря погіршує умови охолодження блоків і приладів МС, що може призвести до перегріву й виведення з ладу таких елементів, як інтегральні мікросхеми, напівпровідникові діоди, транзистори та ін.

Сонячна радіація впливає на елементи МС своєю довгохвильовою (інфрачервоними променями) і короткохвильовою (ультрафіолетовими променями) частинами спектра. Тепловий вплив інфрачервоних променів за своїм характером схожий на вплив підвищеної температури. Під впливом ультрафіолетових променів в елементах і вузлах МС можуть відбуватися незворотні фізико-хімічні зміни.

Багато полімерних матеріалів, що містять хлор, можуть розкладатися. Сонячне світло прискорює процес окиснення металів, старіння й руйнування лакофарбових покриттів. Усе це призводить до швидкого змінення параметрів вузлів МС, що знижує їх роботоздатність.

Механічні навантаження. Вузли МС зазнають механічних впливів в основному двох типів: ударів і вібрацій. Удари мають місце під час транспортування й проведення монтажних робіт, пов'язаних з установленням стійок (шаф). Величина їх впливу характеризується величиною ударного прискорення.

Ударів і вібрацій особливо зазнають вузли МС, які встановлено на рухомих об'єктах, що може призвести до порушення цілісності пайок, контактів, закріплених деталей, до замикання й обривів у керувальних і сигнальних ланцюгах.

Унаслідок знакозмінної дії ударно-вібраційних навантажень швидко накопичуються ознаки втоми елементів з наступною, зазвичай раптовою відмовою. Під час експлуатації МС, що мають примусову систему вентиляції, небажані вібраційні явища виникають унаслідок дії потоку повітря, що проходить через вузли МС.

Особливо небезпечною є вібрація вузлів апаратури на частотах, близьких до їхньої власної частоти. Вібраційні частоти 15–150 Гц призводять до виникнення резонансних явищ в конструкціях МС, що зі свого боку призводить до ослаблення й руйнування пайок, різьбових з'єднань, обриву виводів деталей, проводів. Через вібрації можливі відхилення параметрів електронних схем (наприклад, зміщення движка), органами регулювань яких є потенціометри.

У цілому всі наведені вище об'єктивні фактори впливають на готовність МС незалежно від волі людини. Однак це не означає, що обслуговий персонал не може боротися з об'єктивними факторами. Відмінне знання природи й характеру впливу об'єктивних факторів на роботоздатність МС дає змогу обслуговому персоналу значно зменшити негативний вплив цих факторів. Тому однією з головних задач обслугового персоналу під час експлуатації МС є ретельне вивчення впливу об'єктивних факторів на роботоздатність вузлів МС і прийняття своєчасних заходів щодо їх ослаблення.

На готовність вузлів МС впливають також екстремальні фактори (ударні хвилі, світлове й радіоактивне проміння, електромагнітні імпульси) [11, 26, 29]. Найбільш істотно ці фактори впливають під час військових дій, стихій, землетрусів тощо.

4.2. Суб'єктивні фактори впливу на готовність мехатронних систем

Під час експлуатації МС необхідно враховувати вплив обслугового персоналу на готовність (суб'єктивні фактори). Збільшення продуктивності в роботі МС потребує підвищених вимог до точності дій операторів і швидкості прийняття рішень або здійснення керувальних функцій. Чималою мірою зростає ступінь відповідальності оператора за свої дії, оскільки через провину людини не тільки недовикористовуються технічні можливості вузлів МС, але й утворюються аварії і катастрофи.

За даними публікацій [21, 26, 27] останнім часом унаслідок хибних і несвоєчасних дій при керуванні складними технічними системами сталося 40 % небезпечних ситуацій при випробуванні реактивних систем, до 64 % аварій на морському флоті і до 70 % катастроф в авіації. Причиною 30 % порушень роботи складного радіоелектронного устаткування стали хібні дії обслугового персоналу [29].

Обслуговий персонал впливає на МС під час застосування їх за призначенням, а також зберігання і проведення системи заходів із технічного обслуговування, оскільки оператори можуть припускатися різноманітних помилок. Зрозуміло, що кількість таких помилок буде тим меншою, чим вищою буде кваліфікація персоналу, кращим знання техніки й більшим досвід роботи.

Зазвичай кількість помилок в роботі обслугового персоналу збільшується при ускладненні обставин і погіршенні зовнішніх умов. Позитивно впливає на зменшення кількості помилок дисциплінованість операторів та їх морально-психологічний стан.

Під час обслуговування МС можуть траплятися два види помилок: такі, що призводять до відмови вузлів МС і затримки часу виконання поточного ремонту, частішого проведення профілактичних робіт,

збільшення часу вирішення завдання, неефективного використання робочого часу та ін.

Характер помилки залежить від складності роботи, що виконується, і ступеня підготовленості обслуговуваного персоналу до її виконання. У практиці технічного обслуговування МС дуже часто мають місце такі помилки обслуговуваного персоналу:

- неточне установлення режимів живлення апаратури, особливо для блоків, що використовують інтегральні мікросхеми великого і надвеликого ступеня інтеграції, перегрів елементів під час паяння, розбризкування припою;

- маніпуляції з електричними ланцюгами, що знаходяться під напругою, під час яких виникають небезпечні перехідні процеси, що спричиняють передчасне руйнування елементів і створення аварійних ситуацій; у такі моменти, як і при ввімкненні апаратури, виникають перенапруження, стрибки струмів, що спричиняє електричні пробої, іскріння та ін.;

- використання іншого елемента замість необхідного, установлення запобіжників, що не відповідають номіналам, довільне регулювання схем або елементів захисту;

- неправильне установлення органів керування чи вузлів МС, незакріплення провідника або його відрив;

- неправильне налаштування апаратури, пов'язане з помилковим вибором місць підімкнення приладів, або узгодження приладів зі схемою;

- незнання основних параметрів, що визначають функціонування апаратури;

- безсистемний пошук і неінформативне діагностування відмов, що невиправдано збільшує час на пошук місця відмови й ремонт МС;

- помилкове оцінювання окремих явищ, які свідчать про ненормальну роботу МС, і у зв'язку з цим несвоєчасне усунення дрібних несправностей, які потім призводять до відмов МС;

- невміння виконати ремонт апаратури під час роботи системи, використовуючи резервні блоки й елементи, що особливо важливо у разі ремонту апаратури тривалого користування, для якої кожне змушене вимкнення, навіть за відсутності відмови (для контрольної перевірки), розглядається як відмова апаратури.

Перелічені вище помилки у більшості випадків є ненавмисними. Проте в практиці експлуатації МС можуть мати місце помилки, пов'язані з навмисним порушенням обов'язкових правил, що зрештою призводить до відмови вузлів МС. До таких помилок належать виключення окремих операцій, додання непередбачених операцій при проведенні певної роботи, порушення порядку виконання якої-небудь операції та ін.

Причиною виникнення помилок в роботі обслуговуваного персоналу є недостатній рівень його фахової підготовки, схемна й конструктивна непристосованість окремих елементів блоків і вузлів мехатронних систем

до обслуговування, відсутність спеціально обладнаних робочих місць, необхідної експлуатаційної документації, недостатня освітленість робочих місць, високий рівень шуму, висока або низька температура тощо.

Рівень підготовки обслугового персоналу позначається головним чином на якості робіт, що проводяться на МС, і часом їх виконання. Персонал, який добре знає будову вузлів МС, а також має достатній практичний досвід, здатний виконувати відповідні роботи, допускаючи при цьому мінімальну кількість помилок.

Маючи статистику щодо характеру відмов різних типів МС, які виникають з провини обслугового персоналу, можна прийняти заходи (організаційні й технічні), що зменшують частоту помилок [21, 27, 29] і час проведення технічного обслуговування, тобто підвищують надійність МС. На готовність МС впливає кваліфікація обслугового персоналу і ступінь його досвіду у виконанні різноманітних операцій.

Зменшити вплив суб'єктивних факторів на готовність МС можна таким чином: автоматизувати роботу МС, щоб звести до мінімуму втручання з боку обслуговго персоналу під час контролю параметрів МС і пошуку несправностей; зменшити кількість органів керування; спростити контрольно-перевірне устаткування; механізувати й автоматизувати виконання робіт з технічного обслуговування; установити захисні системи, що виключають вплив помилкових дій оператора; підвищити кваліфікацію і почуття відповідальності обслугового персоналу за доручену справу.

Слід зазначити, що повністю виключити суб'єктивні фактори неможливо, їх завжди потрібно враховувати. Проте безперечно, що чим об'єктивнішим буде контроль правильної роботи вузлів МС під час їх функціонування, чим ефективнішою їх профілактика, тим менше несправностей доведеться усувати і тим вищою буде їх готовність.

Контрольні запитання

1. Назвіть етапи експлуатації МС різного застосування.
2. Дайте означення резервної системи.
3. Які типи надмірності використовують для резервування мехатронних систем?
4. Дайте означення відмови мехатронної системи.
5. Назвіть суб'єктивні фактори відмов.
6. Назвіть об'єктивні фактори відмов.
7. Яким чином атмосферний тиск і сонячна радіація впливають на засоби мехатронних систем?
8. Обґрунтуйте дію механічних навантажень на вузли мехатронних систем.
9. Яким чином біологічні фактори впливають на надійність і готовність мехатронних систем?

5. ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

5.1. Показники безвідмовності

Простим показником, який використовується для оцінювання безвідмовності невідновних об'єктів (систем, елементів), є інтенсивність відмов $\lambda(t)$ — умовна ймовірність виникнення відмови невідновлюваного об'єкта, яка визначається для певного часу за умови, що до цього моменту часу відмова не виникла. Отже, інтенсивність відмов є показником того, скільки об'єктів у певний момент часу відмовляють за одиницю часу після цього моменту (для малих інтервалів часу).

Початковими даними для визначення інтенсивності відмов є кількість невідновних об'єктів, що експлуатуються, і кількість відмов, які отримано за певний термін експлуатації (квартал, рік і т. ін.). За статистичними (дослідними) даними інтенсивність відмов можна визначити за формулою

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n}{N(t)\Delta t} = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (5.1)$$

де Δn — кількість відмов в інтервалі Δt ,

$N(t)$, $N(t + \Delta t)$ — кількість робоздатних об'єктів, відповідно в моменти часу t і $t + \Delta t$.

Якщо за розрахованими таким чином частковими значеннями інтенсивностей відмов для кожного інтервалу часу Δt ($t = 1, 2, \dots, k$) побудувати гістограму і з'єднати ці значення плавною кривою, то отримаємо функцію $\lambda(t)$, що є характеристикою залежності інтенсивності відмов від часу роботи (рис. 5.1).

Іноді нарівні з інтенсивністю відмов визначають частоту відмов за формулою

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n}{N_0\Delta t} = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N_0\Delta t}, \quad (5.2)$$

де N_0 — кількість робоздатних об'єктів у початковий момент часу (наприклад, на початку випробувань).

За отриманими під час експлуатації (випробувань) даними будується гістограма частоти відмов з використанням правил математичної статистики (рис. 5.2).

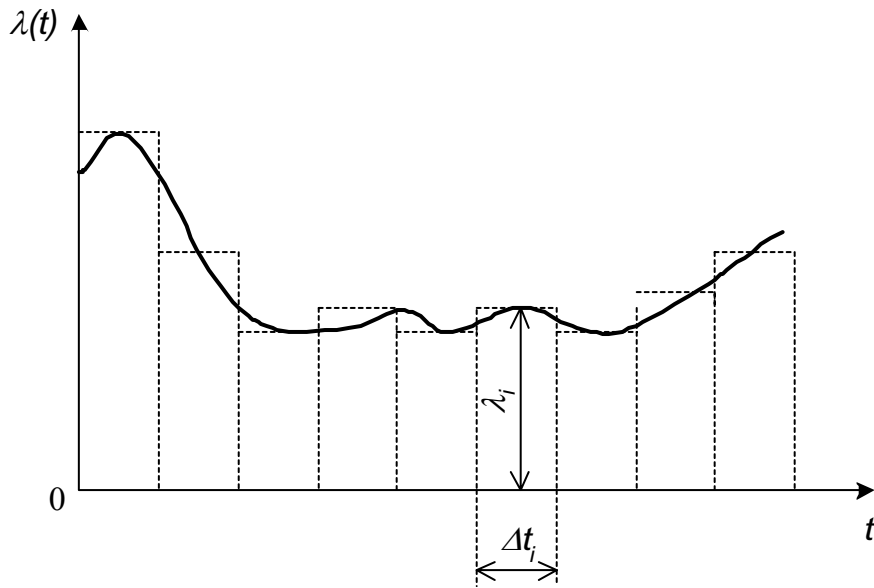


Рис. 5.1. Функція інтенсивності відмов

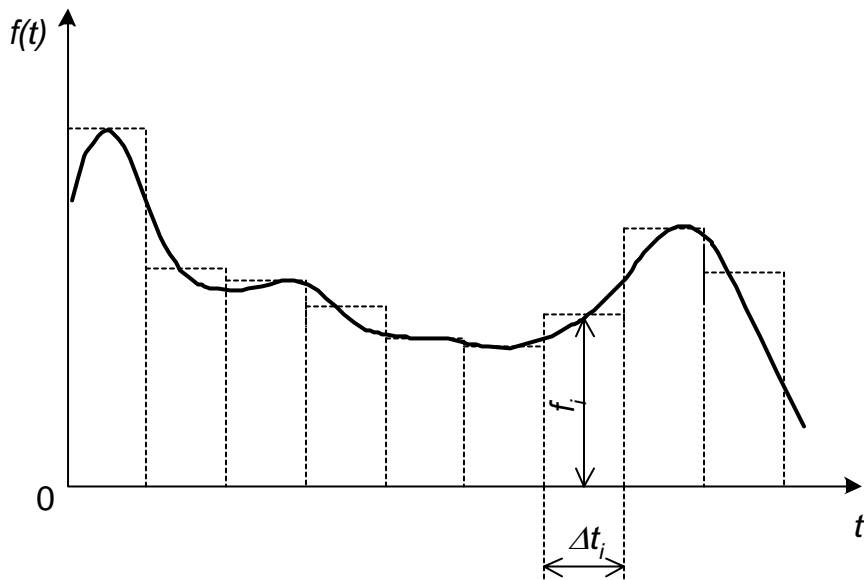


Рис. 5.2. Функція частоти відмов

Важливим показником безвідмовності невідновних об'єктів є середній час $T_{сер}$ наробку на відмову, який визначається як математичне сподівання наробку об'єкта до першої відмови. Як зазначалося, наробок на відмову через наявність в апаратурі раптових відмов є величиною випадковою. Повною характеристикою випадкової величини є закон розподілу $f(t)$.

Середній час наробку на відмову

$$T_{сер} = \int_0^{\infty} tf(t)dt, \quad (5.3)$$

де $f(t)$ — щільність розподілу ймовірності наробку на відмову.

Оцінка середнього наробку на відмову за статистичними даними залежить від плану випробувань і закону розподілу наробку на відмову. Так, якщо випробування ведеться до відмови усіх об'єктів, то середній наробок на відмову статистично визначається як частка від ділення суми нарбок досліджуваних об'єктів на кількість спостережуваних об'єктів:

$$\hat{T}_{сер} = N_o^{-1} \sum_{i=1}^{N_o} t_{p_i},$$

де N_o — кількість спостережуваних об'єктів;

T_{p_i} — нарбок i -го об'єкта.

Зазвичай відомими є дані про відмови за певний час T , коли з N_o об'єктів, що є у наявності до початку експлуатації, відмовлять тільки n . Тоді для визначення середнього наробку на відмову за умови, що має місце експоненційний розподіл наробку на відмову, слід скористатися співвідношенням

$$\hat{T}_{сер} = n^{-1} \left[\sum_{i=1}^n t_{p_i} + T(N_o - n) \right]; \quad n \neq 0. \quad (5.4)$$

Найбільш поширеним показником безвідмовності є ймовірність безвідмовної роботи, тобто ймовірність того, що в межах заданого часу роботи не виникне відмови об'єкта. Іншими словами, це ймовірність того, що час безвідмовної роботи об'єкта t_p буде більше за деякий заданий час t ($P(t) = P(t_p > t)$). Чим більшим є заданий інтервал часу, для якого визначається надійність об'єкта, тим меншим буде значення ймовірності безвідмовної роботи, і навпаки.

Ймовірність безвідмовної роботи визначається статистичним шляхом за інформацією про відмови за певний інтервал часу з використанням формули

$$\hat{P}_i = N^{-1}(N - n_i), \quad (5.5)$$

де N — кількість об'єктів, що є роботоздатними до початку заданого інтервалу часу ($\Delta t = 0$);

n_i — кількість об'єктів, що відмовили до кінця заданого інтервалу часу.

Точність визначення ймовірності безвідмовної роботи тим вища, чим більше об'єктів перебуває під наглядом під час експлуатації або випробувань.

При значній кількості об'єктів статистична ймовірність P_i^* зводиться до ймовірності $P(t)$, тобто граничне значення дорівнює істинному значенню ймовірності безвідмовної роботи. Надійність об'єкта можна також оцінювати ймовірністю відмови $q(t), Q(t)$.

Оскільки безвідмовна робота і відмова є подіями протилежними і становлять повну групу несумісних подій, то $Q(t) = 1 - P(t) = P(t_p \leq t)$. Отже, ймовірність відмови є ймовірністю того, що час безвідмовної роботи об'єкта t_p набуде значення, не більше від заданого часу t .

Статистичне значення ймовірності відмови дорівнює відношенню кількості об'єктів, які відмовили за досліджуваний інтервал часу, до кількості об'єктів, що були роботоздатними до початку цього інтервалу:

$$\hat{Q}_i = 1 - P_i = n_i N^{-1}, \quad (5.6)$$

де n_i — кількість об'єктів, що відмовили за інтервал часу $(0, t_{pi})$, з N об'єктів, що експлуатуються (випробовуються).

Зазвичай становить інтерес знання характеру змінення надійності з часом, тобто функцій $P(t)$ і $Q(t)$. Якщо інтервал часу (сумарний наробок за певний термін експлуатації) розбити на невеликі інтервали й фіксувати кількість відмов до кінця кожного з них, то за отриманими з допомогою формул (5.5) і (5.6) даними можна побудувати графіки $P(t)$ і $Q(t)$, приблизний вигляд яких зображено на рис. 5.3.

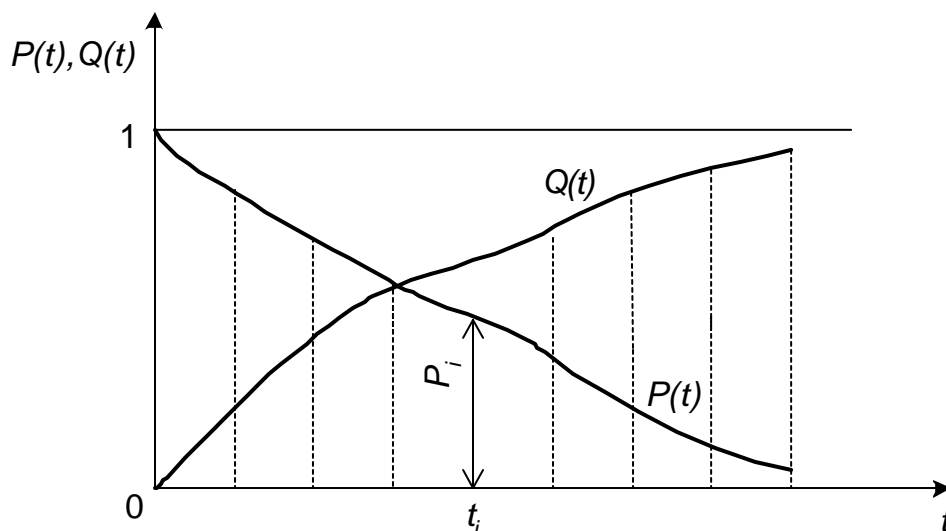


Рис. 5.3. Функції надійності й ймовірності відмов

Крива $P(t)$ має назву функції надійності. Вигляд кривої залежить від внутрішніх властивостей елементів певних типів і умов їх роботи. Проте

функція надійності має і загальні властивості: $P(0) = 1$, тобто вважають, що в початковий момент часу всі об'єкти перебувають у роботоздатному стані; $P(t)$ є незростальною функцією часу, тобто її значення або монотонно зменшуються, або залишаються постійними на окремих ділянках; $P(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, тобто при збільшенні часу роботи об'єкта ймовірність його безвідмовної роботи зменшується і в перспективі стає такою, що дорівнює нулю. Функція $Q(t)$, як це впливає з наведеного вище означення, є функцією розподілу наробку на відмову, або інтегральним законом розподілу величини T .

Знання залежності $P(t)$ дає змогу визначати ймовірність того, що об'єкт, який пропрацював протягом часового інтервалу $(0, t_i)$, не відмовить упродовж подальшого інтервалу часу від t_i до t_{i+1} . У цьому випадку розраховують умовну ймовірність безвідмовної роботи $P(t_i, t_{i+1})$ упродовж наробку від t_i до t_{i+1} за умови, що в момент часу t_i об'єкт був працездатним.

Умовна ймовірність безвідмовної роботи (див. рис. 5.3) упродовж інтервалу наробку (t_i, t_{i+1}) дорівнює відношенню функції надійності в кінці інтервалу t_{i+1} до функції на початку інтервалу t_i :

$$P(t_i, t_{i+1}) = P(t_{i+1})/P(t_i). \quad (5.7)$$

Під час експлуатації часто виникає завдання апріорного оцінювання показників надійності. Його можна вирішити, знаючи аналітичні залежності між різними показниками надійності. Якщо відомою є функція $f(t)$ — щільність розподілу напрацювання до відмови, — то можна записати:

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt; \quad (5.8)$$

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_t^\infty f(\tau) d\tau; \quad (5.9)$$

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (5.10)$$

Скориставшись виразами (5.9) і (5.10), можна довести, що

$$T_{cp} = \int_0^\infty P(t) dt. \quad (5.11)$$

З аналізу виразів (5.2) і (5.7) випливає, що

$$P(t)\lambda(t)\Delta t = f(t) \Delta t,$$

звідки

$$\lambda(t) = f(t)/P(t).$$

З практики експлуатації МС відомо, що найпоширенішим є показовий (експоненціальний) закон розподілу наробку на відмову

$$f(t) = \lambda \exp[-\lambda t]; t > 0, \quad (5.12)$$

при цьому інтенсивність відмов $\lambda(t)$ є величиною сталою.

Скориставшись виразами (5.9) – (5.12), отримаємо

$$Q(t) = 1 - \exp[-\lambda t];$$

$$T_{сер} = 1/\lambda.$$

Далі розглянемо показники надійності, що характеризують безвідмовність відновлюваних МС, до яких належать параметр потоку відмов $\omega(t)$ і наробок на відмову T_0 .

Процес експлуатації багатьох відновлюваних МС можна описати таким чином. У початковий момент часу МС починає роботу і працює до відмови. Після цього відбувається відновлення роботоздатності і МС знову працює до відмови і т.д. Таким чином формується потік відмов. Наробок на відмову є випадковою величиною.

Параметром потоку відмов називають щільність імовірності виникнення відмови відновлюваного об'єкта, що визначається для певного моменту часу. Потоки відмов МС зазвичай є ординарними, тобто ймовірністю виникнення двох і більше відмов за один і той самий момент часу можна знехтувати.

Кількісний опис ординарних потоків відмов є найбільш простим за відсутності післядії, коли ймовірність виникнення відмов у будь-якому інтервалі наробку (t_1, t_2) не залежить від виникнення відмов в інших інтервалах, що не перетинаються.

Для ординарних потоків відмов, що не мають післядії, імовірність безвідмовної роботи МС на інтервалі (t_1, t_2) буде визначатися так:

$$P(t_1, t_2) = \exp \left[- \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt \right].$$

Часто при експлуатації складних МС трапляється стаціонарність потоку відмов, який є величиною постійною, тобто $\omega(t) = \omega$. Тоді ймовірність безвідмовної роботи на інтервалі Δt

$$P(t) = \exp[-\omega \Delta t]. \quad (5.13)$$

За наявності реального потоку відмов допущення про відсутність післядії не виконується [21 – 26]. Тоді за моделі реальних потоків беруться потоки з обмеженою післядією, значення наробку в яких між послідовними відмовами є незалежними випадковими величинами.

Обмежена післядія виявляється в тому, що ймовірність виникнення відмови за час наробку (t_1, t_2) залежить від наробку між останньою відмовою і початком цього інтервалу і не залежить від того, коли сталися попередні відмови.

Досвід експлуатації МС КІВ свідчить, що у більшості випадків щільність розподілу наробку між відмовами підпорядковується показовому (експоненційному) закону: $\omega(t) = \lambda$, де λ — параметр розподілу (інтенсивність відмов). Оцінка $\hat{\omega}(t)$ параметра потоку відмов визначається як $\hat{\omega}(t) = \hat{\lambda}$. Таким чином, за експериментальними даними параметр потоку відмов для кожного інтервалу наробку Δt_i можна розрахувати за формулою

$$\hat{\omega} = \Delta n_i [N \Delta t_i]^{-1}, \quad (5.14)$$

де $\Delta n(i)$ — кількість відмов N відновлюваних МС на інтервалі Δt_i .

Якщо $N = 1$, то параметр потоку відмов відображає кількість відмов МС за одиницю часу:

$$\hat{\omega}_i = \frac{\Delta n_j}{\Delta t_j}. \quad (5.15)$$

Змінення параметра потоку відмов у часі можна подати у вигляді графіка (рис. 5.4), на якому є три характерні ділянки.

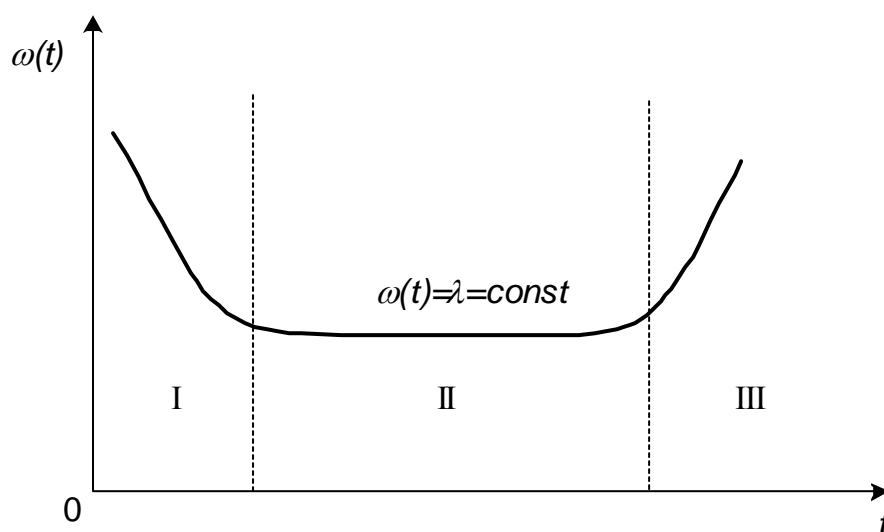


Рис. 5.4. Типова крива змінення параметра потоку відмов

Ділянка I відповідає початковому періоду експлуатації МС, що має назву періоду припрацювання. У цей період спостерігається збільшення кількості відмов через наявність різних виробничих недоробок і виходу з ладу найбільш слабких елементів з прихованими дефектами (виробничі й конструкційні відмови).

Після усунення помилок і заміни елементів справними параметр потоку відмов системи зменшується. Тривалість періоду припрацювання залежить від типу апаратури й інтенсивності відмов комплектувальних елементів і становить зазвичай десятки, а іноді й сотні годин. Чим одноріднішими є показники безвідмовності елементів, тим меншим буде період припрацювання. Завдяки малій тривалості цього періоду (що є перевагою) перед початком експлуатації мехатронну систему можна не випробувувати [29, 30].

Ділянка II характеризується сталістю значення параметра потоку відмов. У цей період мають місце зазвичай раптові відмови, а його тривалість залежить від середнього терміну служби масових елементів апаратури й умов експлуатації. Цей період є основним у «житті» апаратури і має назву періоду нормальної експлуатації.

Значення параметра потоку відмов у період нормальної експлуатації можна зменшити шляхом своєчасного і якісного технічного обслуговування. Для цього періоду експлуатації, як впливає з практики [30], щільність розподілу наробку між відмовами підпорядковується показниковому (експоненційному) розподілу.

Ділянка III характеризується значним збільшенням кількості відмов, що пов'язано зі зношенням і старінням масових елементів (резисторів, конденсаторів, ізоляції та ін.) [19, 21]. З настанням цього періоду подальша експлуатація МС є недоцільною.

Наробок на відмову — це відношення наробку відновлюваного об'єкта до математичного сподівання кількості його відмов упродовж цього наробку. За статистичними даними, отриманими під час експлуатації, наробок на відмову визначається як відношення сумарного наробку відновлюваних об'єктів до сумарної кількості відмов цих об'єктів [21, 28]:

$$\hat{T}_0 = \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{j=1}^N t_{p_{ij}} \left[\sum_{j=1}^N n_j \right]^{-1}, \quad (5.16)$$

де $t_{p_{ij}}$ — i -те напрацювання j -ї системи;

n_j — кількість відмов j -ї системи;

N — кількість однотипних систем.

При оцінюванні наробку на відмову однієї мехатронної системи

$$\hat{T}_0 = n_i \sum_{i=1}^n t_{p_i} .$$

Наробок на відмову у загальному випадку залежить від часу, протягом якого його визначають. Це обумовлено непостійністю характеристики потоку відмов.

У тому випадку, коли наробок між відмовами описується експоненціальним законом розподілу, оцінити час наробку на відмову можна за формулою $\hat{T}_0 = \frac{1}{\lambda^*}$.

Для випадку, коли має місце найпростіший потік відмов, наробок на відмову T_0 дорівнює середньому наробку до відмови $T_{сер}$.

5.2. Показники збережуваності й довговічності

Розглянемо характеристики надійності об'єкта (МС) в умовах зберігання або транспортування. Властивість об'єкта зберігати встановлені показники його якості при зберіганні й транспортуванні в певних умовах має назву *збережуваності* [19, 21, 29].

Під *терміном збережуваності* розуміється календарна тривалість зберігання або транспортування об'єкта в заданих умовах, протягом і після якої зберігаються значення заданих показників у певних межах. Тут маються на увазі показники, що визначають роботоздатність об'єкта.

Для оцінювання властивості збережуваності великої групи однотипних об'єктів використовують такі показники, як середній термін збережуваності й гамма-відсотковий термін збережуваності, під яким розуміється термін збережуваності об'єкта із заданою імовірністю γ -відсотків. Так, наприклад, якщо $\gamma = 95\%$ (95-відсотковий термін збережуваності), то це означає, що 95% об'єктів цієї партії досягнуть установленого терміну збережуваності.

Гамма-відсотковий термін збережуваності визначається з рівняння [21]

$$1 - F_{m_3}(t) = 0,01\gamma , \quad (5.17)$$

де $F_{m_3}(t)$ — функція розподілу терміну збережуваності.

Показники довговічності базуються на двох основних поняттях: технічний ресурс і термін експлуатації [21, 28, 29].

Технічним ресурсом (або просто *ресурсом*) називають наробок об'єкта від початку експлуатації або її відновлення після середнього або капітального ремонту до настання граничного стану.

Терміном експлуатації називають календарну тривалість експлуатації об'єкта від початку експлуатації або її відновлення після середнього або капітального ремонту до настання граничного стану.

Ці показники наводяться в експлуатаційній документації (формулярі (паспорті), технічному описі та ін.) і є основою для списання об'єкта або відправлення його для середнього або капітального ремонту. З цією метою визначаються такі показники, як середній ресурс і середній термін експлуатації до списання, середній ресурс і середній термін експлуатації до середнього (капітального) ремонту, а також середній ресурс і середній термін експлуатації між двома середніми (капітальними) ремонтами.

Якщо є дані про ресурс (термін експлуатації, термін збережуваності) певної групи N однотипних об'єктів, то статистичну оцінку $\hat{\tau}$ середнього ресурсу (термін експлуатації, термін збережуваності) визначають за формулою [21]

$$\hat{\tau} = \tau + (N - m) m^{-1} \tau_{з.в}, \quad (5.18)$$

де $\tau = m^{-1} \sum_{i=1}^m \tau_i$;

m — кількість об'єктів, що виробили ресурс до закінчення випробувань;

$\tau_{з.в}$ — значення ресурсу, при якому припинено випробування.

τ_i — ресурс (термін експлуатації, термін збережуваності) i -го об'єкта.

У випадку усіченої вибірки оцінка середнього значення показників довговічності (збережуваності) визначається з урахуванням законів їх розподілу.

Для деяких типів об'єктів установлюється такий показник довговічності, як *призначений ресурс* [28].

Призначений ресурс — це сумарний наробок, при досягненні якого експлуатацію об'єкта має бути припинено незалежно від його стану. Цей показник установлюється для об'єктів (пристроїв, елементів), відмова яких може призвести до тяжких наслідків. Імовірність безвідмовної роботи об'єкта впродовж часу, що дорівнює призначеному ресурсу, має наближатися до одиниці.

5.3. Показники ремонтпридатності

Ці показники вводяться для відновлюваних МС. Процес відновлення, що полягає у виявленні й усуненні відмов, як і процес виникнення відмов, є випадковим. За випадкову величину тут береться час відновлення, який залежить від багатьох чинників (характеру відмови, пристосованості

апаратури до швидкого виявлення відмови, рівня підготовки обслугового персоналу, швидкості заміни елемента, що відмовив, та ін.) [21 – 29].

Час відновлення — це час, що витрачається на виявлення відмови, пошук причин її виникнення й усунення наслідків відмови. Досвід експлуатації апаратно-програмних засобів мехатронних систем свідчить, що основну частку часу відновлення (80—90 %) становить процес виявлення елемента, що відмовив [21, 26, 27].

Розглянемо основні показники ремонтпридатності МС.

Імовірність відновлення в заданий час (імовірність своєчасного відновлення) — це імовірність того, що час відновлення працездатності об'єкта не перевищить заданий. Аналітично це можна записати так:

$$P_B(t) = P\{t_B \leq t\}, \quad (5.19)$$

звідки випливає, що $P_B(t)$ є функцією розподілу, або інтегральним законом розподілу, часу відновлення. Якщо є відомою щільність розподілу часу відновлення, то

$$P_B(t) = \int_0^t f_B(\tau) d\tau. \quad (5.20)$$

Середній час відновлення T_B — математичне сподівання часу відновлення роботоздатності,

$$T_B = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt. \quad (5.21)$$

Під час експлуатації МС доцільно вести облік відмов і часу відновлення роботоздатності вузлів МС. Тоді за певний календарний термін експлуатації за наявними статистичними даними середній час відновлення можна обчислити за формулою

$$\hat{T}_B = n^{-1} \sum_{i=1}^n t_{B_i}, \quad (5.22)$$

де t_{B_i} — час відновлення i -ї відмови;

n — кількість відмов за певний термін експлуатації (місяць, квартал, рік та ін.).

Час відновлення T_B значною мірою залежить від професійної підготовки обслугового персоналу і наявності у нього навичок виявлення й

усунення відмов. Тому при оцінюванні ремонтпридатності МС слід узагальнити дані за великою кількістю однотипних зразків МС, які обслуговує різний персонал, щоб зменшити вплив суб'єктивних чинників і отримати узагальнений результат. У цьому випадку необхідно підсумувати інтервали часу відновлення за всіма зразками й розділити цю суму на загальну кількість відмов (відновлень).

Інтенсивність відновлення (параметр потоку відновлень) — це кількість відновлень, здійснених за одиницю часу. У разі експоненційного розподілу часу відновлення інтенсивність відновлення можна визначити як відношення кількості відновлень системи за деякий термін експлуатації до сумарного часу відновлення за той самий термін:

$$\hat{\mu} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_{e_i}} = \hat{T}_e^{-1} \quad (5.23)$$

$$P_e(t) = 1 - \exp(-\mu t). \quad (5.24)$$

5.4. Показники надійності системи людина — машина

Досі розглядалися показники надійності тільки технічних засобів (МС, МК). Водночас умовою успішного виконання будь-якого завдання є не лише безвідмовна робота техніки, але й безвідмовний стан, безпомилкові й своєчасні дії операторів.

Тому при оцінюванні показників якості експлуатації МС і МК, особливо на етапі застосування їх за призначенням, технічні засоби й обслуговий персонал необхідно розглядати як єдину систему — систему «людина — машина» (СЛМ). Для такої системи необхідно розширити поняття «відмова».

Під відмовою СЛМ розумітимемо подію, яка має місце у разі відмови технічних засобів або людини, помилки чи несвоєчасних дій оператора (або їх комбінації) і призводить до невиконання завдань, які поставлено перед системою.

За основний показник надійності СЛМ можна взяти ймовірність безвідмовного, безпомилкового і своєчасного виконання завдання системою, що визначається через показники надійності оператора й технічних засобів з урахуванням їх взаємного впливу.

Для оцінювання надійності оператора доцільно застосовувати кілька основних показників [21, 29].

1. Імовірність безпомилкової роботи оператора

$$P_{оп} = \prod_{i=1}^m P_i^{k_i} \approx \exp \left[- \sum_{i=1}^m (1 - P_i)^{k_i} \right] = \exp \left[- \sum_{i=1}^m v_i T_i k_i \right], \quad (5.25)$$

де P_i — імовірність безпомилкового виконання операцій i -го типу;
 v_i — інтенсивність помилок i -го типу;
 k_i — кількість виконаних операцій i -го типу;
 m — кількість різних типів операцій.

Значення показників P_i і v_i можна обчислити за статистичними даними, отриманими під час експлуатації:

$$\hat{P} = N_i^{-1} (N_j - n_j); \quad (5.26)$$

$$\hat{v} = n_j / N_j T_j, \quad (5.27)$$

де N_i — загальна кількість виконаних операцій i -го типу;
 n_j — кількість помилок, допущених при виконанні операцій i -го типу;
 T_c — середній час виконання операцій i -го типу.

Характер змінення надійності оператора протягом робочого дня зображено на рис. 5.5, де ділянка I відповідає фазі впрацьовування, ділянка II — фазі стійкої працездатності і ділянка III — фазі стомлення оператора [21].

Слід зауважити, що формулу (5.26) можна застосовувати лише для фази стійкої працездатності оператора.

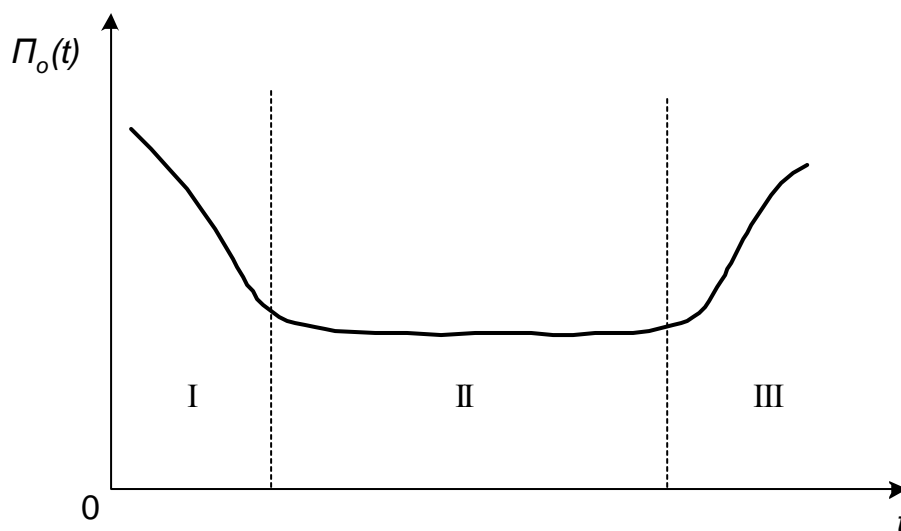


Рис. 5.5. Ділянки змінення значення показника надійності оператора $\Pi_o(t)$

2. Показник готовності оператора мехатронної системи

$$K_{оп} = 1 - \frac{T_{від}}{T_{заг}}, \quad (5.28)$$

де $T_{від}$ — час, упродовж якого оператора з тих або інших причин немає на робочому місці (і тому він не може прийняти інформацію для виконання);

$T_{заг}$ — загальний час роботи оператора.

3. Імовірність виправлення оператором помилки

$$P_{випр} = P_k P_{вияв} P_{вип}, \quad (5.29)$$

де P_k — імовірність видачі сигналу схемою контролю;

$P_{вияв}$ — імовірність виявлення оператором сигналу контролю;

$P_{вип}$ — імовірність виправлення помилкових дій при повторному виконанні алгоритму.

4. Імовірність своєчасних дій оператора

$$P_{сд} = P\{\tau < t_n\} = \int_0^{t_n} f(\tau) d\tau. \quad (5.30)$$

де $f(\tau)$ — функція розподілу часу вирішення завдання оператором;

t_n — ліміт часу, що потребується на вирішення завдання.

Показник своєчасності дії оператора введено тому, що правильні, але несвоєчасні дії дають той самий результат, що й при виникненні помилки, тобто можуть призвести до невиконання завдання. Показники надійності СЛМ у цілому залежать від особливостей процесів керування. Згідно з цим критерієм можна виокремити три класи СЛМ (безперервного й змішаного типів і дискретних) і три різновиди показників надійності [22].

Системи безперервного (першого) типу. У таких системах процес керування відбувається безперервно. Якщо процес проходить нормально, то оператор тільки спостерігає за ним, а в разі відхилення від норми — відновлює процес (рис. 5.6, а). Для таких систем характерним є високий ступінь автоматизації усіх процесів (перевірки, підготовки, застосування за призначенням). До операторів, що працюють з такими системами, ставлять високі вимоги щодо дій у разі екстрених ситуацій. Система може виконати поставлене завдання в таких випадках:

- технічні засоби перебувають у працездатному стані;
- технічні засоби відмовили, але оператор безпомилково й своєчасно виконав необхідну дію з усунення наслідків відмови;
- оператор допустив помилкові дії при усуненні наслідків відмови, але своєчасно їх виправив.

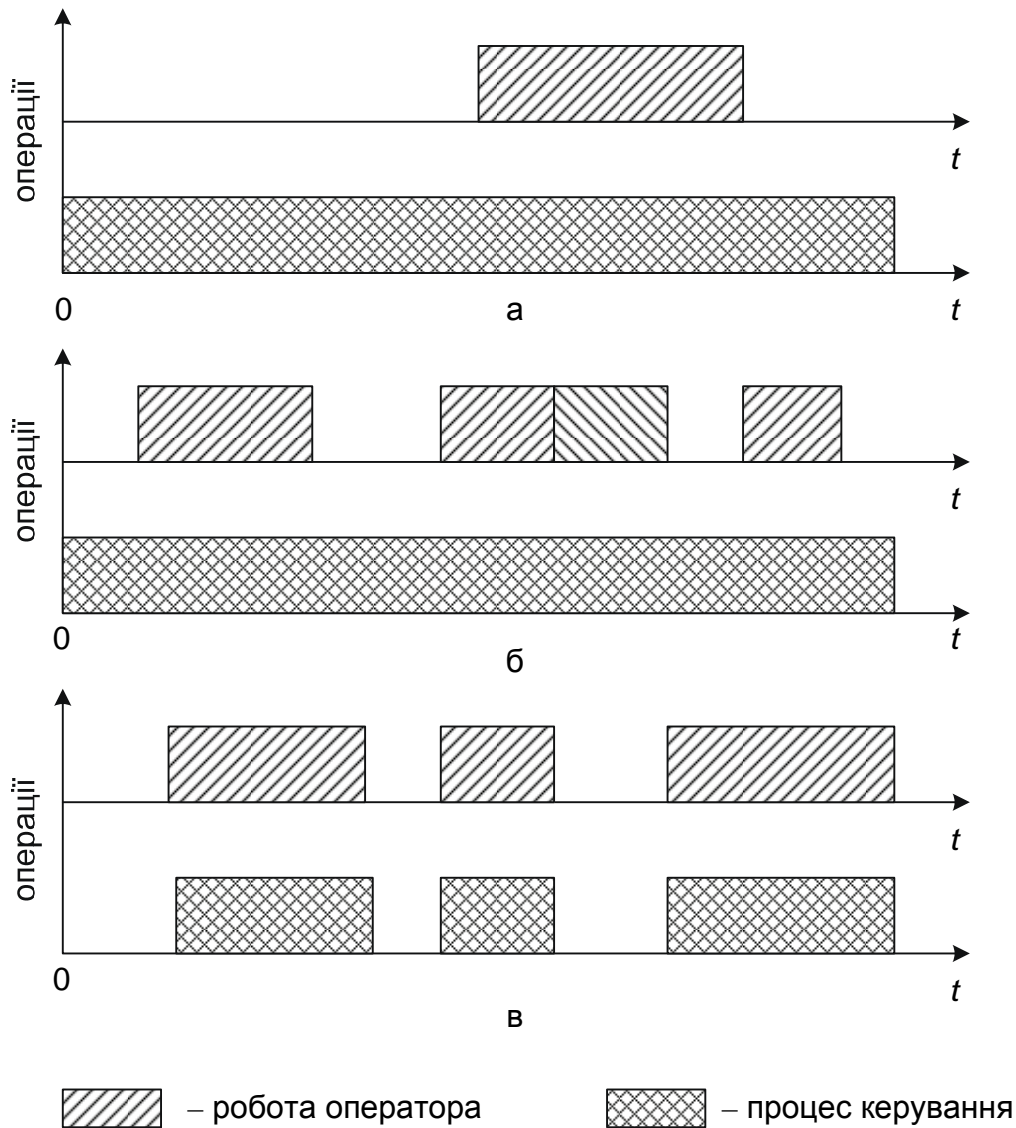


Рис. 5.6. Часові діаграми роботи для різних систем людина — машина: а — безперервних; б — змішаних; в — дискретних

Таким чином, за показник надійності системи безперервної дії можна взяти ймовірність безвідмовного, безпомилкового і своєчасного перебігу процесу керування впродовж заданого часу t .

Скориставшись загальними правилами визначення ймовірності складних подій з урахуванням розглянутих вище можливих ситуацій, отримаємо вираз для показника надійності СЛМ першого типу:

$$P_{СЛМ_1}(t) = P_T(t) + [1 - P_T(t)]K_{оп}[P_{оп}P_{сд} + (1 - P_{оп})P_{вип}(t_l)], \quad (5.31)$$

де $P_T(t)$ — ймовірність безвідмовної роботи технічних засобів;
 $K_{оп}$ — коефіцієнт готовності оператора;

P_{cd} — імовірність своєчасного виконання оператором необхідних дій;

$P_{вип}(t_n)$ — імовірність виправлення помилкових дій.

Системи змішаного (другого) типу. Процес керування в цьому випадку має безперервний характер, проте діяльність оператора полягає в періодичному вирішенні кількох завдань (рис. 5.6, б). В інтервалах між вирішеннями завдань в оператора оперативна пауза. До систем такого типу належать системи передачі даних, системи масового обслуговування та ін.

Система такого типу може виконати завдання в тому випадку, коли в необхідний момент часу оператор буде готовий до прийняття інформації і при цьому має місце одна з таких ситуацій:

— упродовж паузи і часу вирішення завдання технічні засоби працювали безвідмовно, оператор правильно і своєчасно виконав необхідні дії;

— сталася відмова технічних засобів, але оператор своєчасно усунув її і при вирішенні завдання не допустив помилок;

— технічні засоби працювали безвідмовно, однак оператор допустив помилку, але своєчасно усунув її.

Отже, показником надійності системи змішаного типу є ймовірність безвідмовного, безпомилкового і своєчасного вирішення завдання, що постає перед системою. З урахуванням розглянутих вище ситуацій отримуємо формулу для розрахунку надійності СЛМ другого типу:

$$P_{СЛМ_2}(t) = K_{оп} [P_T(t) P_{оп} P_{cd} + (1 - P_T(t)) P_в P_{оп} P_{cd} + (1 - P_{оп}) P_T(t) P_{вип}], \quad (5.32)$$

де $P_в$ — імовірність своєчасного відновлення працездатності техніки.

Системи дискретного (третього) типу. Для цих систем є характерною яскраво виражена дискретність вирішення окремих завдань. У перервах оператор очікує чергове завдання й готується до його вирішення. У таких системах робота оператора збігається за часом з роботою технічних засобів (рис. 5.6, в).

Для СЛМ дискретного типу застосуємо такий самий показник надійності, як і для систем змішаного типу. Завдання системою дискретного типу буде виконано за наявності однієї з таких можливих ситуацій:

— у необхідний момент технічні засоби перебувають у працездатному стані й не відмовлять протягом заданого часу виконання завдання, а дії оператора є безпомилковими й своєчасними;

— техніку, яка була неготовою або відмовила, своєчасно відновлено, оператори при вирішенні завдання не допускали помилок;

— технічні засоби працювали безвідмовно, однак оператор допустив помилку, але своєчасно її виправив.

Формула для розрахунку надійності системи людина – машина у цьому випадку має вигляд [21]

$$P_{слмз}(t) = K_2 P_T(t) P_{оп} P_{сд} + \{1 - K_2 P_T(t)\} P_в P_{оп} P_{сд} + (1 - P_{оп}) P_T(t) P_{вип}, \quad (5.33)$$

де K_2 — коефіцієнт готовності технічних засобів.

5.5. Показники надійності резервовних мехатронних систем і комплексів

Резервування є основним методом підвищення надійності МС і МК шляхом уведення надмірності, тобто додаткових засобів і можливостей більше за мінімально необхідні для виконання системою або комплексом заданих функцій. Резервування широко використовується в практиці експлуатації МС і МК.

Залежно від характеру введеної надмірності розрізняють структурне, часове, інформаційне й функціональне резервування. При структурному резервуванні під час експлуатації МС передбачається використання додаткових систем. При часовому резервуванні для отримання необхідних показників надійності використовується надмірний час. При інформаційному резервуванні передбачається використання надмірної інформації, при функціональному — можливість об'єктів (елементів) виконувати додаткові функції або сприймати додаткові навантаження.

При експлуатації МС і МК, особливо в умовах обмеженості в часі процесу керування найбільше застосування знаходить структурне резервування. При структурному резервуванні розрізняють: навантажений резерв, коли резервний елемент навантажено так само, як і основний; полегшений резерв, коли резервний елемент навантажено менше, ніж основний; ненавантажений резерв, коли резервний елемент не має навантаження.

Загальне резервування полягає в резервуванні об'єкта в цілому. При роздільному резервуванні резервуються окремі елементи об'єкта або їх групи. Резервування, при якому резервні елементи беруть участь у функціонуванні об'єкта нарівні з основними, називають постійним.

Резервування заміщенням — це такий вид резервування, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного елемента.

Кратністю резервування називають відношення кількості резервних елементів до кількості резервованих ними основних елементів об'єкта. Резервування, кратність якого дорівнює одиниці, називають дублюванням.

Загальне резервування (резерв навантажених). Імовірність безвідмовної роботи системи оцінюється таким чином:

$$P_{з.р}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{k+1} [1 - P_i(t_p)], \quad (5.34)$$

де $P_i(t_p)$ — імовірність безвідмовної роботи i -ї системи впродовж терміну наробку $(0, t_p)$;

k — кратність резервування.

При рівнонадійних системах і показовому розподілі наробку на відмову отримаємо значення ймовірності безвідмовної роботи системи за таким виразом:

$$P_{з.р}(t) = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_0 t_p]\}^{k+1}, \quad (5.35)$$

де λ_0 — інтенсивність відмов однієї системи.

Середній наробок на відмову

$$T_{сер.р} = T_{сер} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{k+1} \right),$$

де $T_{сер} = 1/\lambda_0$ — середній наробок на відмову однієї системи.

Інтенсивність відмов резервної системи можна визначити за виразом [21]

$$\lambda_{з.р}(t) = \frac{\lambda_0(k+1) \exp[-\lambda_0 t_p] \{1 - \exp[-\lambda_0 t_p]\}^k}{1 - \{1 - \exp[-\lambda_0 t_p]\}^{k+1}}. \quad (5.36)$$

У тих випадках, коли $\lambda_0 t_p < 0,1$,

$$P_{з.р}(t_p) \approx 1 - (\lambda_0 t_p)^{k+1},$$

$$\lambda_{з.р}(t_p) \approx (k+1) \lambda_0^{k+1} t_p^k.$$

Роздільне резервування (резерв навантажених). Імовірність безвідмовної роботи визначається виразом [15]

$$P_{р.р}(t_p) = \prod_{i=1}^m \{1 - [1 - P_j(t_p)]^{k_j+1}\}, \quad (5.37)$$

де $P_j(t_p)$ — імовірність безвідмовної роботи i -го елемента (ділянки резервування) упродовж наробку $(0, t_p)$;

m — кількість ділянок резервування;

k_j+1 — кількість паралельно з'єднаних на логичній схемі елементів в i -й ділянці резервування.

У разі рівнонадійних елементів і показового розподілу наробку на відмову ймовірність безвідмовної роботи

$$P_{p.p}(t_p) = \left\{ 1 - [1 - \exp(-\lambda_0 t_p)]^{k+1} \right\}^m. \quad (5.38)$$

Середній наробок системи на відмову у цьому випадку визначають за виразом [21]

$$T_{p.p} = \frac{(m-1)!}{\lambda_0(k+1)} \sum_{i=0}^k [a_i(a_i+1)\dots(a_i+m-1)]^{-1}, \quad (5.39)$$

а інтенсивність відмов знаходять так:

$$\lambda_{p.p}(t_p) = \frac{m(k+1)\lambda_0 \exp[-\lambda_0 t_p] \{1 - \exp[-\lambda_0 t_p]\}^k}{1 - \{1 - \exp[-\lambda_0 t_p]\}^{k+1}}. \quad (5.40)$$

У разі, коли $\lambda_0 t_p < 0,1$, імовірність безвідмовної роботи знаходять за таким виразом:

$$P_{p.p}(t_p) \approx (1 - \lambda_0 t_p)^m [1 + \lambda_0 t_p + (\lambda_0 t_p)^2 + \dots + (\lambda_0 t_p)^k]^m.$$

Загальне резервування з дробовою кратністю. Імовірність безвідмовної роботи знаходять за формулою [19]

$$P_{\partial.p}(t_p) = \sum_{i=0}^{k+1-h} C_{k+1}^i P_0^{k+1-i}(t_p) \sum_{j=0}^i (-1)^j C_i^j P_0^j(t_p), \quad (5.41)$$

де $P_0(t_p)$ — імовірність безвідмовної роботи основного або будь-якого резервного пристрою впродовж наробку $(0, t_p)$;

h — кількість пристроїв, необхідних для нормальної роботи резервної системи.

При показовому розподілі наробку на відмову середній наробок

$$T_{\partial.p} = \lambda_0^{-1} \sum_{i=0}^{k+1-h} (h+i)^{-1}. \quad (5.42)$$

Ненавантажене резервування з абсолютно надійними перемикачами. Розглянемо випадок загального резервування. У разі роздільного резервування наведені нижче формули можна використовувати при розрахунках надійності для окремих ділянок резервної схеми.

При ненавантаженому резерві ймовірність безвідмовної роботи системи, що має один основний і k резервних пристроїв, обчислюється за рекурентною формулою [19]

$$P_{k+1}(t_p) = P_k(t_p) + \int_0^{t_p} P_{k+1}(t_p - \tau) f_k(\tau) d\tau, \quad (5.43)$$

де $P_k(t_p)$ — імовірність безвідмовної роботи системи, що має один основний і $k - 1$ резервних пристроїв;

$P_{(k+1)}(t_p - \tau)$ — імовірність безвідмовної роботи $(k+1)$ -го резервного пристрою впродовж наробку $t_p - \tau$ за умови, що до моменту τ цей пристрій був працездатним;

$f_k(\tau)$ — щільність розподілу наробку на відмову системи, яка має один основний і $k - 1$ резервних пристроїв.

При показовому розподілі відмов, за наявності рівнонадійних елементів і при ненавантаженому резерві ймовірність безвідмовної роботи системи можна оцінити за таким виразом:

$$P_{k+1}(t_p) = \exp[-\lambda_0 t_p] \sum_{i=1}^k \frac{(\lambda_0 t_p)^i}{i!}, \quad (5.44)$$

де λ_0 — інтенсивність відмов одного з $k + 1$ пристроїв, паралельно з'єднаних за схемою резервування.

Час $T_{нар}$ середнього наробку на відмову

$$T_{нар} = (k + 1) \lambda_0^{-1}. \quad (5.45)$$

Наведені вище формули оцінювання надійності резервних систем дають змогу під час експлуатації вирішити такі основні завдання:

— за заданими показниками надійності вибрати вид і мінімальну кратність резервування;

— визначити з досвіду експлуатації фактичне значення надійності резервних систем з використанням різних видів резервування.

Ці формули дають змогу отримати точкові оцінки експлуатаційних показників. Під час експлуатації зазвичай мають справу з обмеженим обсягом статистичного матеріалу (кількості відмов, часу наробку на

відмову та ін.). У цьому випадку точкова оцінка може значно відрізнятись від оцінюваного експлуатаційного показника, тобто призводити до грубих помилок. Наприклад, оцінкою для математичного сподівання (точного значення експлуатаційного показника) може бути середнє арифметичне значення отриманих під час експлуатації значень випадкової величини (наробку на відмову, часу відновлення та ін.).

При дуже великій кількості статистичних даних з великою імовірністю середнє арифметичне буде дуже близьким до математичного сподівання. Якщо ж кількість статистичних даних є невеликою, то заміна математичного сподівання середнім арифметичним значенням призводить до помилки, яка в середньому тим більша, чим менше статистичних даних. Тому при обробленні обмеженого обсягу статистичних даних, отриманих під час експлуатації, необхідно визначити точність і достовірність оцінки експлуатаційних показників. Характеристикою точності й достовірності оцінки експлуатаційних показників у цьому випадку є довірчі інтервали й довірчі ймовірності [19]. Нехай унаслідок оброблення дослідних даних для

деякого експлуатаційного показника θ отримано оцінку $\hat{\theta}$. Візьмемо деяку досить велику ймовірність β (зазвичай $\beta = 0,95; 0,99; 0,999$), таку, що подію при цьому можна вважати майже достовірною. Далі знайдемо значення інтервалу ε , для якого

$$P\left(\left|\hat{\theta} - \theta\right| < \varepsilon\right) = P\left(-\varepsilon < \hat{\theta} - \theta < \varepsilon\right) = P\left(\hat{\theta} - \varepsilon < \theta < \hat{\theta} + \varepsilon\right) = \beta. \quad (5.46)$$

Чим менше інтервал ε для ймовірності β , тим точнішою буде оцінка. З наведеного вище співвідношення видно, що ймовірність того, що невідомий експлуатаційний показник θ потрапить в інтервал $(\hat{\theta} - \varepsilon, \hat{\theta} + \varepsilon)$ з випадковими кінцями, дорівнює β . Імовірність β називають довірчою ймовірністю, а інтервал $(\hat{\theta} - \varepsilon, \hat{\theta} + \varepsilon)$ — довірчим інтервалом. Межі інтервалу $\theta_1 = \hat{\theta} - \varepsilon$ і $\theta_2 = \hat{\theta} + \varepsilon$ називають довірчими межами. Величина (ширина) довірчого інтервалу характеризує точність оцінки, а довірча ймовірність — достовірність (надійність) оцінки експлуатаційного показника [19, 21].

Порядок знаходження довірчих інтервалів залежить від закону розподілу оцінки показника θ і, як наслідок, від закону розподілу оброблюваних випадкових величин. При обробленні експлуатаційних даних для визначення довірчих інтервалів можна скористатися методикою, викладеною, наприклад, у публікаціях [19, 21, 30].

Контрольні запитання

1. Назвіть показники безвідмовності мехатронних систем.
2. Назвіть показники ремонтпридатності мехатронних систем.
3. Назвіть показники збережуваності мехатронних систем.
4. Назвіть показники надійності системи людина — машина.
5. Назвіть показники довговічності мехатронних систем.
6. Обґрунтуйте показники надійності резервовних мехатронних систем і комплексів.
7. Дайте означення точкових та інтервальних оцінок.
8. Дайте означення календарного ресурсу.
9. Яким є порядок знаходження довірчих інтервалів?

6. ГОТОВНІСТЬ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

6.1. Основні положення

Готовність є важливим поняттям, яке вживається стосовно не тільки МС, але й персоналу, що їх обслуговує. Надалі поняття готовності МС і комплексів пов'язуватимемо з результатом взаємодії складових: МС і комплексів — з одного боку і обслугового персоналу — з іншого. З аналізу функціонування МС і комплексів випливає, що їх готовність визначається такими властивостями й чинниками [1, 2, 19, 21, 26, 27, 29]:

- надійність;
- прийнята система технічного обслуговування й контролю технічного стану;
- наявність технічного ресурсу;
- досконалість організаційної структури обслугових підрозділів, системи планування й керування діяльністю обслугового персоналу при організації експлуатаційних процесів;
- організація процесу обслуговування вимог (заявок) та інтенсивність їх надходження;
- структура взаємодії окремих МС комп'ютерно-інтегрованого виробництва (КІВ);
- своєчасне освоєння й уміле використання МС;
- удосконалення системи ремонту й організації обслуговування;
- мобілізація обслугового персоналу на зменшення термінів освоєння нових МС, проведення заходів з поглибленого вивчення можливостей кожної мехатронної системи й КІВ у цілому;

— виховання високої технологічної дисципліни, уміння й готовності обслугового персоналу брати максимум від МС та ін.

Очевидно, враховування наведених властивостей і чинників буде визначати модель (структуру) процесу експлуатації МС і комплексів, тобто послідовність і взаємозв'язок експлуатаційних заходів, спрямованих на підтримку їх у справному й готовому до застосування стані. Отже, справність, підготовленість і незавантаженість МС залежатиме від вибраної моделі експлуатації, тобто як від властивостей МС, так і від структури експлуатаційного процесу й організації процесу надходження вимог на обслуговування до МС.

Типова МС (комплекс) складається з великої кількості різноманітних пристроїв (підсистем), які під час експлуатації підлягають контролю технічного стану й технічному обслуговуванню з різною періодичністю. Контроль технічного стану дає змогу виявити стан МС і за необхідності під час технічного обслуговування відновити її.

Залежно від організації контролю технічного стану й технічного обслуговування можливі такі моделі експлуатації відновлюваних МС (комплексів) [19, 21, 26, 30]:

— моделі процесу експлуатації з періодичним технічним обслуговуванням (ТО) і відсутністю контролю за технічним станом МС у періоди між ТО;

— моделі процесу експлуатації з періодичним ТО і безперервним контролем технічного стану в період між ТО;

— моделі процесу експлуатації з безперервним контролем технічного стану МС за відсутності ТО;

— моделі процесу експлуатації з періодичним ТО і періодичним контролем технічного стану МС у період між ТО.

Можна навести аналогічну класифікацію моделей процесу експлуатації МС і за іншими ознаками. Для організації експлуатації мехатронних систем КІВ необхідно розглянути такі моделі процесу експлуатації :

— відновлюваних резервовних МС;

— мехатронного комплексу в цілому при різних схемах їх побудови і моделях обслуговування;

— мехатронних систем при обслуговуванні різних потоків вимог і т. ін.

Зі свого боку, з моделей процесу експлуатації відновлюваних резервовних МС найчастіше використовується на практиці модель процесу експлуатації дубльованих МС, як з рівнонадійними, так і з різнонадійними каналами. При визначенні готовності важливе значення мають оцінки функціонування обслуговуваних дубльованих МС з ненадійними контрольними-перемикальними пристроями (КПП) при різних стратегіях їх технічного обслуговування [29].

Властивості й чинники, що визначають рівень готовності МС і комплексів, за своєю природою є випадковими, оскільки вони залежать від великої кількості випадкових характеристик і параметрів. Тому й показники

готовності МС і комплексів також мають імовірно-статистичний характер.

Значення кількісних показників готовності у різних моделях процесу експлуатації дають змогу [19, 21, 29]:

- визначати середню кількість МС у комплексі, готових до виконання завдання в будь-який момент надходження команди на застосування;
- порівнювати МС і комплекси за ступенем готовності;
- планувати черговість проведення експлуатаційних заходів, спрямованих на підтримку заданого ступеня готовності, і вирішувати інші завдання.

6.2. Показники готовності

Показники готовності належать до комплексних показників надійності, оскільки характеризують одночасно декілька властивостей (складових) надійності [19, 26, 29].

Коефіцієнт готовності (K_z) — імовірність того, що об'єкт буде працездатним у довільний момент часу, окрім планованих періодів, упродовж яких використання об'єкта за призначенням не передбачається (планове технічне обслуговування, плановий ремонт). За статистичними даними, отриманими за певний термін експлуатації, коефіцієнт готовності визначається як відношення сумарного часу знаходження спостережуваних об'єктів у працездатному стані до добутку кількості цих об'єктів і тривалості експлуатації (за винятком простоїв на проведення планових ремонтів і технічного обслуговування):

$$\hat{K}_z = [NT_e]^{-1} \sum_{i=1}^N T_{pi}, \quad (6.1)$$

де N — кількість спостережуваних об'єктів;

T_{pi} — сумарний час перебування i -го об'єкта в роботоздатному стані;

T_e — тривалість експлуатації, що складається з інтервалів часу роботи й відновлення, які послідовно чергуються;

Для більшості відновних МС такий порядок обслуговування має місце у разі негайного усунення відмови. Для цих систем коефіцієнт готовності обчислюється таким чином:

$$K_z = T_0 [T_0 + T_e]^{-1}. \quad (6.2)$$

З цієї формули видно, що коефіцієнт готовності є характеристикою одночасно двох різних властивостей надійності об'єкта — безвідмовності й ремонтпридатності.

Оскільки коефіцієнт готовності залежить від часу, його часто називають *функцією готовності*. Цю залежність відображає розмічений граф станів відновлюваної простої системи, що має два можливі стани: роботоздатності S_0 і нероботоздатності S_1 . Імовірність перебування системи в роботоздатному стані позначимо через $P_0(t)$. При виникненні відмови система переходить у стан S_1 з інтенсивністю відмов λ . Імовірність перебування системи в стані S_1 позначимо через $P_1(t)$. Після відновлення система повертається в стан S_0 з інтенсивністю відновлення μ .

З урахуванням зроблених припущень можна скласти систему рівнянь Колмогорова для визначення змінних $P_0(t)$ і $P_1(t)$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda P_0(t) - \mu P_1(t) \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

за умови $P_0(t) + P_1(t) = 1$. Визначимо ймовірність знаходження МС в стані S_0 — $P_0(t)$.

Розв'язавши систему (6.3) з урахуванням початкових значень $P_0(0) = 1$ і $P_1(0) = 0$, отримуємо функцію готовності

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t]. \quad (6.4)$$

За експоненційним законом розподілу наробку між відмовами значення λ і μ знаходять за виразами $\lambda = [T_0]^{-1}$ і $\mu = [T_e]^{-1}$. Тоді функція готовності матиме вигляд

$$P_0(t) = K_2(t) = \frac{T_0}{T_0 + T_e} + \frac{T_e}{T_0 + T_e} \exp\left[-\left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_e}\right)t\right]. \quad (6.5)$$

Стационарне значення коефіцієнта готовності визначається таким чином:

$$K_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} K_2(t) = \frac{T_0}{T_0 + T_e}, \quad (6.6)$$

що узгоджується з виразом (6.2).

Ступінь впливу чинників безвідмовності й відновлюваності на швидкість змінення готовності можна оцінити за змінням середньої швидкості наробку на відмову V_{T_o} і середнього часу відновлення V_{T_e} .

Диференціюючи вираз для K_2 за параметрами T_o і T_e , отримаємо

$$V_{T_o} = \frac{dK_2}{dT_o} = \frac{T_e}{(T_o + T_e)},$$

$$V_{T_e} = \frac{dK_2}{dT_e} = \frac{-T_o}{(T_o + T_e)^2}.$$

Зіставляючи V_{T_o} і V_{T_e} при $T_o > T_e$, можна зробити висновок, що для підвищення готовності МС разом з підвищенням безвідмовності в роботі слід проводити заходи, які приводять до зменшення часу відновлення МС після виникнення відмови. Якщо залежність (6.6) записати у вигляді

$$K_2(t) = (1 + \rho)^{-1} \{1 + \rho \exp[-\mu(1 + \rho)t]\}, \quad (6.7)$$

де $\rho = T_e / T_o$, і побудувати залежність $K_2(t)$ від коефіцієнта $\rho = T_e / T_o = \lambda / \mu$ (рис. 6.1) [21], то наочно видно, що при збільшенні значення ρ готовність МС зменшується, але стаціонарний режим устанавлюється швидше, а тривалість перехідного процесу визначається величиною μ : чим його значення більше, тим швидше настає стаціонарний режим.

При $\rho \ll 1$ і значних μ (МС з високим рівнем безвідмовності й ремонтпридатності) тривалість перехідного процесу для $K_2(t)$ в основному визначається інтенсивністю μ .

З урахуванням того, що

$$\lambda = [m_{t_o}]^{-1}, \quad \mu = [m_{t_e}]^{-1}, \quad m_{t_o} = M[T_o], \quad m_{t_e} = M[T_e],$$

коефіцієнт готовності буде таким:

$$K_2(t) = K_2 + (1 - K_2) \exp\{-t[K_2 m_{t_e}]\}^{-1}. \quad (6.8)$$

При $\lambda = \text{const}$ і $\mu = \text{const}$ у початковий період експлуатації МС значення $K_2(t)$ приблизно дорівнює значенню імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ на інтервалі $(0, t)$.

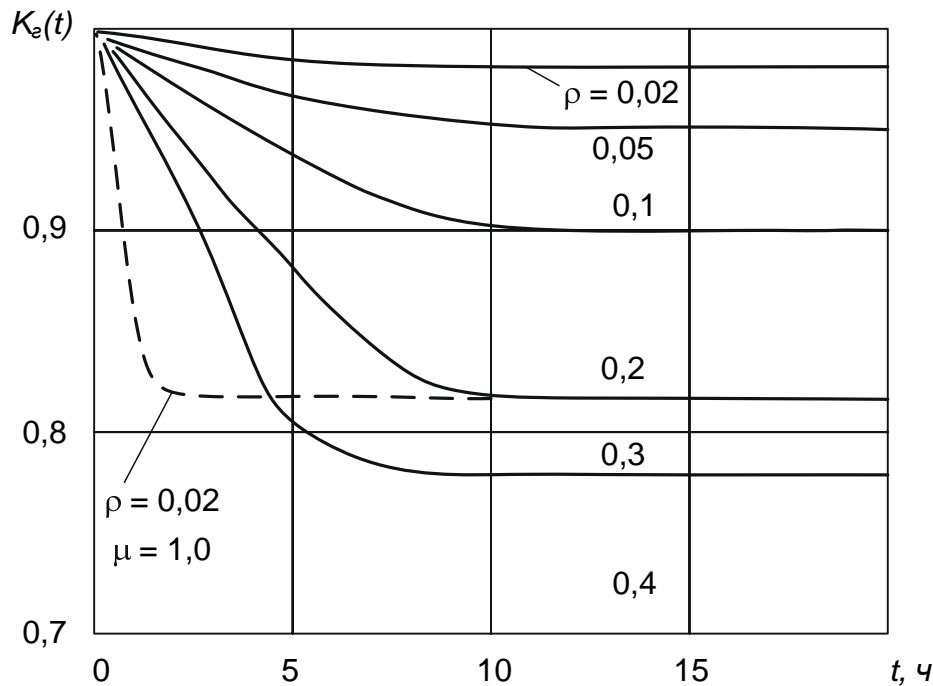


Рис. 6.1. Функції $K_e(t)$ при показових розподілах часу безвідмовної роботи й часу відновлення

Якщо у формулах (6.5) і (6.7) для $K_e(t)$ і $P(t)$ розкласти експоненти в ряди й обмежитися лінійними членами, то при малих t отримаємо $K_e(t) \approx P(t) \approx 1 - t[K_2 m_{t_e}]^{-1}$.

Щоб уникнути трудомістких обчислень значень $K_e(t)$ у нестационарний період, вважають, що до деякого моменту t_1 , при якому ймовірність безвідмовної роботи $P(t_1) = K_2$, значення $K_e(t)$ збігається зі значенням $P(t)$; при $t > t_1$ має місце нерівність $P(t) \neq K_2$ [19, 26]. При цьому максимальна похибка матиме місце в точці t_1 (див. рис. 6.1). Її визначають з умови

$$\exp\left(\frac{-t_1}{m_{t_o}}\right) = m_{t_o} [m_{t_o} + m_{t_e}]^{-1}, \text{ звідки } t_1 = -m_{t_o} \ln K_2 \text{ [21].}$$

Підставивши значення t_1 у формулу (6.7), після перетворень отримаємо $K_e(t_1) = K_2 + (1 - K_2)K_2^{(1-K_2)^{-1}}$. При цьому максимальна відносна похибка обчислень

$$\Delta K_e(t_1) = \frac{K_e(t_1) - K_2}{K_2} 100\% = \frac{(1 - K_2)K_2^{(1-K_2)^{-1}}}{K_2 + (1 - K_2)K_2^{(1-K_2)^{-1}}} 100\%. \quad (6.9)$$

Зазвичай $K_2 \geq 0,9$, тоді

$$K_2 \gg (1 - K_2)K_2^{(1-K_2)^{-1}}; \quad \Delta K_e(t) \approx (1 - K_2)K_2^{(1-K_2)^{-1}} \cdot 100\%.$$

Для $K_2 > 0,9$ похибка є невеликою (менше 4 %) і зі збільшенням значення K_2 швидко зменшується [21].

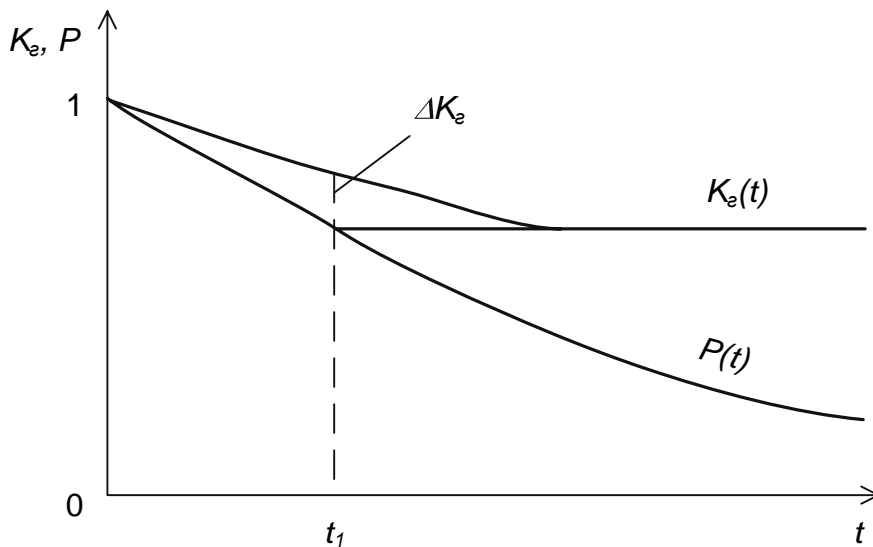


Рис. 6.2. Графіки залежностей $K_2(t)$ і $P(t)$

При розподілах часу безвідмовної роботи, що відрізняються від показового, часто існує провал функції готовності на початковій ділянці, тоді $K_2(t)$ матиме вигляд, показаний на рис. 6.3. Тут можна виокремити характерні точки $t_1 - t_3$.

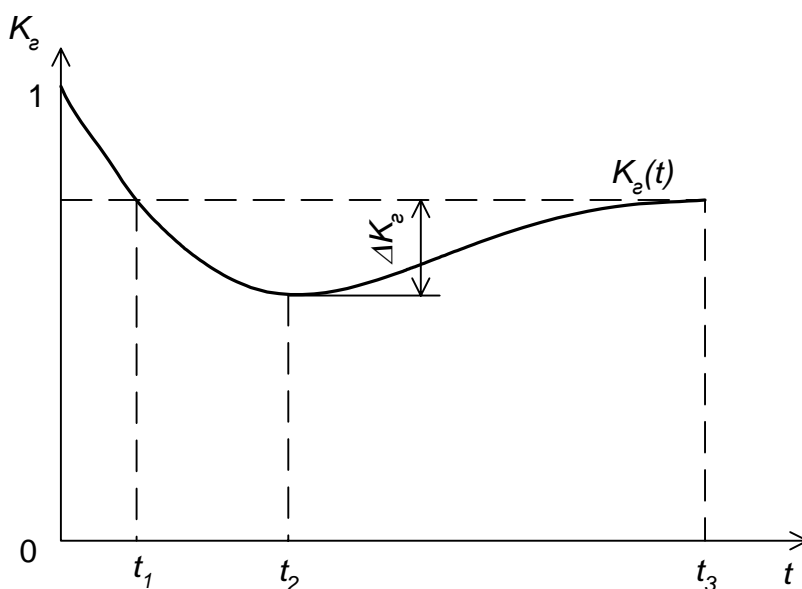


Рис. 6.3. Нестационарна ділянка $K_2(t)$ мехатронної системи, у якій час безвідмовної роботи описується суперпозицією двох експоненційних законів розподілу відмов

На ділянці $(0, t_1)$ значення функції готовності трохи відрізняється від імовірності безвідмовної роботи МС за час $(0, t_1)$. У випадках, коли вдається знайти межу допустимого наближення, можна вважати, що $K_e(t) \approx P(t)$. У точці t_2 функція $K_e(t)$ досягає мінімального значення.

Провал $\Delta K_e = K_e - K_e(t_2)$ функції готовності залежить від законів розподілу часу безвідмовної роботи й відновлення. Завдання визначення $K_e(t_2)$ має аналітичне вирішення лише для випадку, коли закон розподілу часу безвідмовної роботи є суперпозицією показових розподілів (при цьому враховується наявність періоду наробку) і час відновлення розподілено за показовим законом [21]. При цьому встановлено, що крутішому спаданню початкової ділянки $\lambda(t)$ відповідає глибший провал функції $K_e(t)$. Крім того, значення провалу і його тривалість збільшуються при збільшенні безвідмовності МС. Тому негативний вплив наробку на функцію готовності найбільш суттєво виявляється у високонадійних МС.

При нормальному законі розподілу часу безвідмовної роботи провал функції готовності збільшується при зменшенні середнього квадратичного відхилення часу безвідмовної роботи. Значення провалу функції готовності може збільшуватися під час експлуатації, тому потрібно запровадити спеціальні заходи з його усунення при проектуванні й виготовленні МС. Зокрема, необхідно ретельно проводити технологічні прогони МС, щоб забезпечити стаціонарність інтенсивності відмов у початковий період експлуатації.

В умовах дії експоненційних законів розподілу часу безвідмовної роботи і часу відновлення основних і резервних елементів функція готовності монотонно збільшується від 1 до K_e . Коли значення розподілу часу безвідмовної роботи елементів відрізняються від значень показового, резервування не лише збільшує стаціонарне значення функції готовності, але й зменшує провал на нестационарній ділянці функції готовності. Передбачається, що час безвідмовної роботи кожного з пристроїв є підпорядкованим закону суперпозиції двох показових розподілів, а час відновлення має показовий розподіл.

Коефіцієнт технічного використання — це відношення математичного сподівання часу перебування об'єкта в роботоздатному стані за деякий період експлуатації до суми математичних сподівань часу перебування об'єкта в роботоздатному стані, часу простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням, і часу ремонтів за той самий період експлуатації [26].

На основі статистичних даних, отриманих з досвіду експлуатації, коефіцієнт технічного використання визначають за виразом

$$\hat{K}_{m.e} = T_p [T_p + T_{рем} + T_{m.o}]^{-1}, \quad (6.10)$$

де T_p — сумарний наробок усіх об'єктів;

$T_{рем}$ — сумарний час простоїв через планові й позапланові ремонти усіх об'єктів;

$T_{м.о}$ — сумарний час простоїв через планове й позапланове технічне обслуговування усіх об'єктів (час простою з організаційних причин тут не враховується).

Якщо заданий час експлуатації $T_{екс}$ для усіх об'єктів є однаковим, то

$$\hat{K}_{м.в} = [NT_{екс}]^{-1} \sum_{i=1}^N T_{рi}, \quad (6.11)$$

де $T_{рi}$ — сумарний час перебування i -го об'єкта в роботоздатному стані;

$T_{екс}$ — термін експлуатації, що складається з інтервалів часу роботи, технічного обслуговування й ремонтів;

N — кількість спостережуваних об'єктів.

Коефіцієнт оперативної готовності — це ймовірність того, що об'єкт, перебуваючи в режимі очікування, буде роботоздатним у довільний момент часу i , починаючи з цього моменту, працюватиме безвідмовно впродовж заданого інтервалу часу t_p [21, 26, 29].

Під режимом очікування (чергування) розуміється такий стан, коли мехатронна система, знаходячись під повним або полегшеним навантаженням, не виконує своїх функцій. Цей режим є характерним для багатьох об'єктів КІВ. Команда на застосування МС за призначенням надходить несподівано, у випадкові моменти часу. Для успішного виконання поставленого завдання необхідно, щоб МС була роботоздатною в момент надходження команди на застосування і не відмовила протягом часу наступного застосування.

Як відомо, ймовірність перебування МС у роботоздатному стані в довільний момент часу характеризується коефіцієнтом K_2 , а ймовірність того, що МС залишиться роботоздатною в режимі застосування за призначенням упродовж заданого часу t_p , має назву ймовірності безвідмовної роботи $P(t_p)$.

Якщо ймовірність безвідмовної роботи МС $P(t_p)$ протягом часу t_p не залежить від моменту початку роботи, то коефіцієнт оперативної готовності $K_{о.г}(t_p)$ можна обчислити за формулою

$$K_{о.г}(t_p) = K_2 P(t_p). \quad (6.12)$$

У МС (МК) можуть відмовляти окремі підсистеми (пристрої), унаслідок чого може знизитися якість виконання поставленого завдання впродовж заданого інтервалу часу. Системи й комплекси, які під час експлуатації

можуть частково втрачати роботоздатність, доцільно характеризувати альфа-відсотковим коефіцієнтом готовності $K_\alpha(t)$, тобто ймовірністю того, що МС у довільний момент часу знаходиться в стані, який забезпечує можливість її роботи на рівні якості функціонування не нижче α , %.

Проте в умовах часової надмірності наведених показників готовності недостатньо. Часто керівнику необхідно знати й ймовірність того, що МС може почати роботу негайно з надходженням заявки або з деякою затримкою, яка не перевершує певного допустимого значення, що залежить від призначеного резерву часу. Цю ймовірність називають функцією готовності за заданий час і знаходять за формулою [21, 29]

$$K_2(t_p, \omega, \tau) = K_2(\tau) + \{1 - K_2(\tau)\} P\{t'_e \leq t_e^*(t_p, \omega)\}, \quad (6.13)$$

де $K_2(\tau)$ — ймовірність того, що МС у момент часу τ перебуває в роботоздатному стані;

t'_e — інтервал часу від моменту τ до моменту відновлення роботоздатності;

$t_e^*(t_p, \omega)$ — граничне допустиме значення t_e ;

t_p — резервний час;

ω — сукупність експлуатаційно-технічних характеристик.

Коефіцієнт готовності за заданий час визначається як граничне значення функції готовності:

$$K_2(t_p, \omega) = K_2 + (1 - K_2) P\{t'_e \leq t_e^*(t_p, \omega)\}. \quad (6.14)$$

Другий доданок у цій формулі виникає внаслідок часової надмірності й перетворюється на нуль, якщо резерву часу немає [21].

Коефіцієнт простою. Математичний вираз для розрахунку ймовірності перебування МС у стані відновлення (простою) має такий вигляд [27]:

$$P_n(t) = \frac{T_B}{T_0 + T_B} \left[1 - \exp\left(-\frac{T_0 + T_B}{T_0 T_B}\right) \right]. \quad (6.15)$$

Стационарне значення цієї ймовірності називають коефіцієнтом простою:

$$K_n = \frac{T_B}{(T_0 + T_B)}. \quad (6.16)$$

Коефіцієнти простою й готовності зв'язані співвідношенням

$$K_n + K_2 = 1.$$

Розрахункові формули для визначення коефіцієнта простою мають такий вигляд:

$$\hat{K}_n = \frac{\sum_{i=1}^n t_{e_i}}{\left(\sum_{i=1}^n t_{i_{e.n}} + \sum_{i=1}^n t_{e_i} \right)};$$

$$\hat{K}_n = \frac{\sum_{i=1}^m t_{i_{e.n}}}{mT_e},$$

де $t_{i_{e.n}}$ — сумарний час перебування i -го вузла мехатронної системи в стані простою ($i = 1, \dots, m$).

Окрім розглянутих показників для оцінювання готовності МС і комплексів можна використовувати коефіцієнт справної роботи, середній час переведення МС у стан готовності до роботи, імовірність переведення МС у стан готовності до роботи та ін.

При розрахунках розглянутих вище показників готовності й стану МС не повністю враховуються специфіка динаміки їх функціонування і взаємодії, а також особливості процесу обслуговування заявок під час застосування за призначенням.

6.3. Готовність мехатронних систем з урахуванням динаміки функціонування

За формулами (6.1) — (6.8) значення K_2 можна визначати тільки для систем, які перебувають у двох станах: несправному (у режимі відновлення) і робочому (у режимі виконання завдання). Деякі МС (комплекси) мають складніші схеми функціонування, а їхній справний стан хоча і є необхідною, але у більшості випадків недостатньою умовою готовності до виконання завдань, що постають перед ними.

У розглянутих показниках готовності не враховується час підготовки МС до застосування, зайнятість МС при виконанні завдання та інші особливості. Унаслідок цього при дослідженні готовності МС необхідно вибрати такий показник, у якому враховувався би час підготовки, час безвідмовної роботи, час відновлення й зайнятість МС обслуговуванням заявок, що надійшли, а також умови застосування МС.

Таким показником готовності може бути ймовірність того, що МС буде справною, підготовленою і не зайнятою до моменту надходження заявки на обслуговування. Цей показник характеризує готовність МС у кожен момент часу, і його можна застосовувати для планування кількості систем, що входять до складу КІВ, для оцінювання ефективності обслуговування вимог і т. ін.

Усе це потребує іншого підходу, що відрізняється від викладеного в літературі традиційного, як до трактування, так і до методів визначення коефіцієнта готовності таких систем. Ці питання ще не отримали належного розвитку в теорії надійності, що сильно ускладнює вирішення багатьох практичних завдань, які виникають при створенні й експлуатації МС різного призначення.

Розглянемо один із можливих підходів до визначення показника готовності систем періодичного використання, що ілюструється на прикладі нерезервовної відновлюваної МС, призначеної для виконання деяких послідовних у часі однорідних завдань (операцій) в умовах, коли моменти надходження й тривалість вирішення кожного завдання є випадковими.

Функціонування системи зазначеного типу опишемо з допомогою такої математичної моделі. Нехай МС може знаходитися в одному з чотирьох різних станів:

— у робочому режимі, коли МС виконує завдання, тобто використовується за призначенням;

— режимі готовності, тобто коли МС не використовується за призначенням, але є справною і в будь-який момент часу може розпочати виконання завдання;

— режимі підготовки, коли МС є справною, але на ній проводиться комплекс робіт з налагодження до чергового використання за призначенням;

— режимі відновлення, тобто коли усувається виявлена відмова, що виникла в одному з трьох наведених вище станів.

Вважатимемо, що параметр стаціонарного пуассонівського потоку відмов системи в робочому режимі має значення α_1 , в режимі готовності — α_2 , в режимі підготовки — α_3 . У загальному випадку $\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq 0$. При відмові у будь-якому з цих режимів МС негайно переводиться в режим відновлення, а після усунення відмови — в режим підготовки. Час відновлення t_e має показовий розподіл з параметром ρ . Час перебування МС в робочому режимі t_p і в режимі підготовки t_n (за відсутності відмов)

розподілено за показовими законами з параметрами $\mu = [t_p^*]^{-1}$ і $\gamma = [t_n^*]^{-1}$, де t_p^* і t_n^* - середній час виконання завдання системою і час підготовки системи.

Сигнали (виклики, команди) на використання МС за призначенням надходять у випадкові моменти часу t_k ($k = 1, 2, \dots, t_k < t_{k+1}$) і утворюють найпростіший потік з параметром λ . Система має розпочати виконання завдання строго в момент t_k , інакше завдання за k -м сигналом буде уважатися невиконаним.

Якщо за час t_p , починаючи з моменту t_k , система не відмовить, то завдання за k -м сигналом вважається виконаним повністю (інакше — лише частково) і система переводиться в режим підготовки, а потім — в режим готовності, якщо за час t_n не настала відмова.

Як видно, справний стан МС є необхідною, але недостатньою умовою готовності до виконання завдання в необхідний момент часу. Дійсно, якщо система у момент t_k перебуває в робочому режимі, то завдання за k -м сигналом не буде виконано, оскільки МС не готова до цього, хоча і є справною. Очевидно, що обидві ці умови виконуються, тільки якщо МС перебуває в режимі готовності.

Таким чином, показник готовності K_2 для МС розглядуваного типу слід трактувати як імовірність того, що МС є справною і підготовленою до роботи. Ця імовірність зі свого боку чисельно дорівнює ймовірності того, що МС перебуває в режимі готовності. Для оцінювання значення цієї імовірності й визначають K_2 .

Позначимо через $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$ імовірності перебування МС у момент t в робочому режимі, режимі готовності, підготовки й відновлення відповідно. Оскільки при зроблених допущеннях процес функціонування системи є транзитивно однорідним марківським з кінцевою кількістю станів, то

$$P_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t); \quad i = \overline{1,4},$$

тоді

$$\tilde{K}_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_2(t) = P_2.$$

Щоб знайти вираз для значення $P_2(t)$, складемо схему можливих переходів МС зі стану в стан (рис. 6.4).

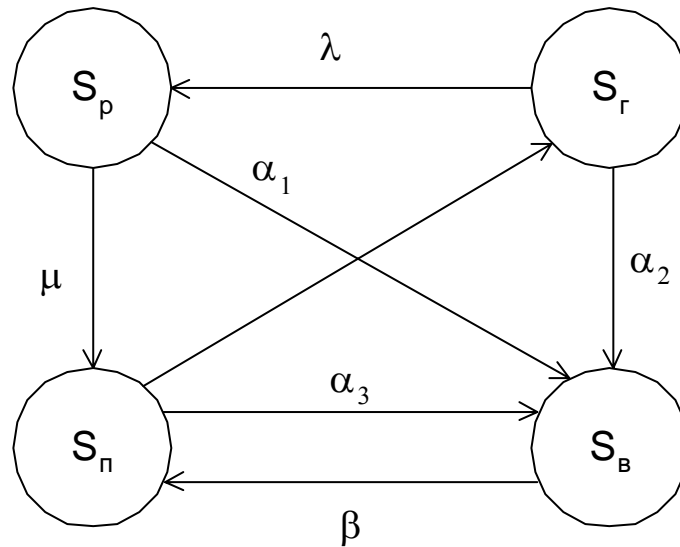


Рис. 6.4. Схема можливих переходів системи

Система диференціальних рівнянь для можливих переходів має вигляд

$$\left. \begin{aligned} \lambda P_2 - (\alpha_1 + \mu) P_1 &= 0; \\ \gamma P_3 - (\lambda + \alpha_2) P_2 &= 0; \\ \beta P_4 + \mu P_1 - (\alpha_3 + \gamma) P_3 &= 0; \\ \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 - \beta P_4 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$

Розв'язання цієї системи з урахуванням умови $\sum_{i=1}^4 P_i = 1$ дає

шуканий вираз для P_2 , який згідно з формулою (6.5) є одночасно виразом для показника готовності МС:

$$\tilde{K}_e = \frac{\beta \gamma (\alpha_1 + \mu)}{\lambda \gamma (\alpha_1 + \beta) + \gamma (\alpha_1 + \mu) (\alpha_2 + \beta) + (\alpha_1 + \mu) (\alpha_2 + \lambda) (\alpha_3 + \beta)}. \quad (6.18)$$

Таким чином, запропонований підхід до визначення показника готовності МС періодичного використання дає змогу врахувати характерні умови й порядок функціонування таких систем і подати K_e як функцію інтенсивностей відмов системи в основних режимах функціонування ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) і середніх значень часу відновлення $t_s = \beta^{-1}$, часу підготовки до роботи $t_n^* = \gamma^{-1}$, часу виконання завдання $t_p^* = \mu^{-1}$ і часу між черговими використаннями МС за призначенням λ^{-1} .

З формули (6.15) при $\lambda = \gamma = 0$ і $\alpha_2 = \alpha_1$ випливає, що $K_e = \beta(\alpha + \beta)^{-1}$, оскільки за цих умов розглядувана МС функціонує як система

неперервного використання. Очевидно, що таке допущення не відображає специфіки МС періодичного використання і в багатьох випадках є неприйнятним, тому використання формули $K_e = \beta(\alpha + \beta)^{-1}$ для визначення показника готовності МС періодичного використання є суттєво обмеженим.

У зв'язку з цим розглянемо залежність K_e від параметра λ , про характер якої дає уявлення крива 1 (рис. 6.5), яку розраховано за формулою (6.15) за деяких фіксованих значень $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta, \gamma$ і μ [21].

Як видно, зі збільшенням λ значення K_e зменшується, асимптотично наближаючись до нуля. Звідси впливає дуже важливий для практики висновок про те, що при створенні й експлуатації МС їх готовність та ефективність необхідно оцінювати відповідно до очікуваної або фактичної інтенсивності використання МС за призначенням. Формула (6.5) для визначення коефіцієнта готовності дає завищений результат порівняно з формулою (6.15) за однакових α_1 і β , причому це завищення тим більше, чим більше значення λ .

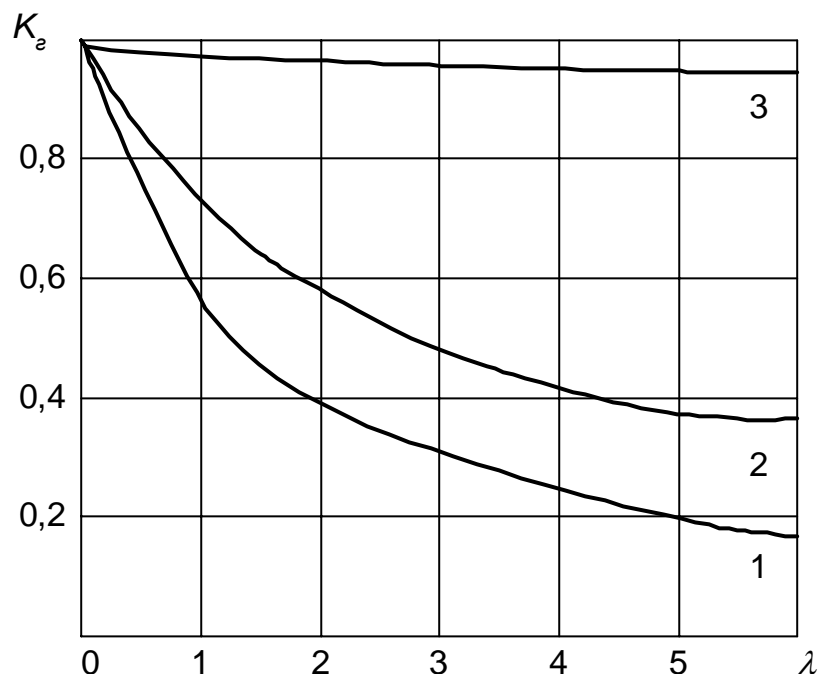


Рис. 6.5. Залежності значень K_e ($\lambda, \alpha_1, \beta, \mu$)

Розглянемо деякі часткові формули для визначення показника готовності МС \tilde{K}_e , які за певних припущень безпосередньо впливають з виразу (6.18) і виявляються дуже корисними при вирішенні багатьох практичних завдань. Так, взявши у виразі (6.15) $t_n^* = \gamma^{-1} = 0$, отримаємо

$$\tilde{K}_e = \frac{\beta(\alpha_1 + \mu)}{\lambda(\alpha_1 + \beta) + (\alpha_1 + \mu)(\alpha_2 + \beta)} \quad (6.19)$$

Залежність \tilde{K}_2 від λ (крива 2, див рис. 6.5) розраховано за формулою (6.16) при тих самих значеннях $\alpha_1, \alpha_2, \beta, \mu$, які було взято при будівництві кривої 1 за формулою (6.18). Звідси видно, що крива 2 відповідає тим найбільшим можливим значенням показника готовності МС \tilde{K}_2 , яких можна досягти, зменшивши середній час підготовки t_n та інтенсивність відмов МС у режимі підготовки α_3 при фіксованих значеннях параметрів $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ і μ .

Отже, залежність (6.18) дає змогу в конкретних умовах визначити принципову можливість досягнення деякого (заданого) необхідного значення \tilde{K}_2 зменшенням тільки t_n і α_3 . Так, наприклад, якщо необхідне значення \tilde{K}_2 знаходиться нижче кривої 2, то така можливість існує; якщо ж вище кривої 2, то для його досягнення вже недостатньо тільки зменшити t_n^* і α_3 , необхідно вжити додаткових заходів. Окрім того, спільне використання формул (6.18) і (6.19) дає змогу оцінити максимальну величину можливого збільшення значення \tilde{K}_2 порівняно з уже досягнутим його значенням при певних t_n^* і α_3 і за величиною цього збільшення визначити доцільність заходів з подальшого зменшення t_n і α_3 . Так, наприклад, з порівняння кривих 2 і 3 випливає, що при $\lambda > 1$ доцільність цих заходів є очевидною, тоді як при $\lambda < 1$ ефективнішими можуть виявитися інші шляхи підвищення показника готовності МС. Такий аналіз можна провести при будь-яких значеннях параметрів у формулі (6.19).

Розглянуті приклади повністю не вичерпують діапазону практичного використання формул (6.18) і (6.19), проте з них випливає, що розглянутий підхід до визначення \tilde{K}_2 дає змогу досить об'єктивно і з кількісного боку підходити до усіх заходів з підвищення або підтримки на необхідному рівні готовності МС як під час їх створення, так і під час експлуатації.

Аналогічно вирішуються завдання дослідження й кількісного оцінювання впливу на готовність МС інших показників процесу функціонування. Для цього можна використати відповідні формули, що також отримують з виразу (6.18) [21].

Так, при $\alpha_1 = 0$

$$\tilde{K}_{21} = [\beta\gamma] [\lambda\gamma\beta + \gamma\mu(\alpha_2 + \beta) + \mu(\alpha_2 + \lambda)(\alpha_3 + \beta)]^{-1};$$

при $\alpha_2 = 0$

$$\tilde{K}_{22} = \beta\gamma(\alpha_1 + \mu) [\lambda\gamma(\alpha_1 + \beta) + \beta\gamma(\alpha_1 + \mu) + \lambda(\alpha_1 + \mu)(\alpha_3 + \beta)]^{-1};$$

при $\alpha_3 = 0$

$$\tilde{K}_{23} = \beta\gamma(\alpha_1 + \mu) [\lambda\gamma(\alpha_1 + \beta) + \gamma(\alpha_1 + \mu)(\alpha_2 + \beta) + \beta(\alpha_1 + \mu)(\alpha_2 + \lambda)]^{-1};$$

при $\tilde{t}_B = \beta^{-1} = 0$

$$\tilde{K}_{24} = \gamma(\alpha_1 + \mu) [\lambda\gamma + \gamma(\alpha_1 + \mu) + (\alpha_1 + \mu)(\alpha_2 + \lambda)]^{-1}.$$

Значення K_2 , обчислені за цими формулами, є тими граничними значеннями, перевищувати які тільки шляхом зменшення інтенсивності відмов МС у робочому режимі α_1 , режимі готовності α_2 , режимі підготовки α_3 і середнього часу відновлення МС t_e неможливо при фіксованих значеннях інших параметрів.

Фізичний зміст і шляхи практичного використання цих формул ті самі, що й для виразу (6.18). За необхідності такі формули можна отримати і для будь-якої комбінації характеристик надійності МС (α_i, β). Наведемо тільки одну найбільш важливу з них, яка дає змогу визначити показник готовності абсолютно надійної МС ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$):

$$\tilde{K}_{2.H} = \gamma\mu[\lambda(\gamma + \mu) + \gamma\mu]^{-1}. \quad (6.20)$$

Слід звернути особливу увагу на фізичний зміст показника готовності МС для випадку $\lambda = 0$. Пояснимо його на прикладі формули (6.19), яка при $\lambda = 0$ набуває вигляду

$$\tilde{K}_2 = \beta\gamma[\gamma(\alpha_2 + \beta) + \alpha_2(\alpha_3 + \beta)]^{-1}.$$

У цій формулі значення \tilde{K}_2 не залежить від μ і α_1 . Цей результат є закономірним, оскільки випадок $\lambda = 0$ означає, що МС не використовується за призначенням у робочому режимі. У цьому випадку МС може перебувати тільки в трьох режимах — готовності, підготовки й відновлення, а ці режими змінюються під дією тільки потоків відмов системи в режимах готовності α_2 і підготовки α_3 .

Отже, \tilde{K}_2 є ймовірністю того, що МС перебуває в режимі готовності за умови, що її використовують за призначенням.

Такий самий фізичний зміст \tilde{K}_2 має і в інших формулах, які отримують з виразів (6.18) — (6.19) при $\lambda = 0$. При цьому необхідно враховувати ті додаткові умови, за яких ці залежності є правильними. Так, наприклад, з формули (6.20) при $\lambda = 0$ випливає, що $\tilde{K}_2 = 1$, оскільки в режимі готовності МС не виходить з ладу ($\alpha_2 = 0$), тобто коли систему не використовують за призначенням, вона перебуває в режимі готовності.

Таким чином, розглянуті вирази дають змогу провести всебічне кількісне оцінювання як комплексного, так і індивідуального впливу основних характеристик і умов застосування МС на її готовність, і на цій основі визначити, шляхи змінення яких характеристик, на яких напрямках і на яку величину можна досягти збільшення \tilde{K}_2 в тих або інших умовах виробництва. Це, зі свого боку, дає змогу відшукати оптимальні шляхи підвищення готовності МС з урахуванням реальних можливостей, а також розв'язати інші практичні завдання, що виникають при створенні й експлуатації МС і комплексів. Використовуючи розглянутий підхід, можна отримати вирази для показника готовності МС КІВ з різними видами резервування й моделей процесу експлуатації.

Контрольні запитання

1. Дайте означення коефіцієнта технічного використання.
2. Дайте означення коефіцієнта готовності.
3. Яким чином обчислюють готовність мехатронних систем з урахуванням динаміки функціонування?
4. Дайте означення коефіцієнта оперативної готовності.
5. Дайте означення показника готовності систем періодичного використання.
6. Назвіть можливі моделі експлуатації відновлюваних мехатронних систем (комплексів).
7. Дайте означення функції готовності.
8. Дайте означення коефіцієнта простою.
9. Обґрунтуйте змінення показника готовності систем періодичного використання.

7. ОСНОВНІ ЕТАПИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

7.1. Загальні поняття експлуатації мехатронних систем

Експлуатація мехатронної системи — стадія життєвого циклу з моменту прийняття її підприємством від заводу-виготовлювача або ремонтного підприємства до зняття з експлуатації.

Зняття мехатронної системи з експлуатації — припинення експлуатації виробу й оформлення певних документів. Зняту з експлуатації МС можна відремонтувати, перевести до навчального класу, переобладнати для використання з метою, що відрізняється від її призначення, або утилізувати.

Система експлуатації — сукупність взаємозв'язаних виробів, засобів їх експлуатації, експлуатаційної документації і виконавців, які призначено для виконання завдань кожного етапу експлуатації.

Керування експлуатацією — система дій органів керування, що вживаються для виконання завдань з експлуатації виробів.

Планування експлуатації виробів — завчасне розроблення заходів з підготовки, забезпечення і здійснення експлуатації виробу із зазначенням термінів виконання цих заходів, виконавців і осіб, що відповідають за організацію і контроль їх виконання.

Вартість системи експлуатації — сумарні трудові, матеріальні й фінансові витрати на створення системи експлуатації виробів і забезпечення їх функціонування на всіх етапах експлуатації.

Засоби експлуатації — будівлі, споруди, технічне устаткування, запасні частини й матеріали, призначені для виконання робіт на вузлах МС на усіх етапах експлуатації.

Етап експлуатації МС — період переведення виробу в певний стан або підтримки в цьому стані впродовж певного терміну.

Умови експлуатації МС — сукупність чинників, які діють на вузли МС при їх експлуатації.

Особливі умови експлуатації характеризуються екстремальними значеннями яких-небудь чинників.

Умови зберігання — сукупність чинників, які діють на вироби при їх зберіганні.

Умови транспортування вузлів МС — сукупність чинників, що діють на вироби при їх транспортуванні.

Технічний стан — стан системи в певний момент часу, у певних умовах зовнішнього середовища зі значеннями параметрів, установлених технічною документацією на вузли МС.

Технічна експлуатація — комплекс робіт, які виконуються на мехатронній системі при приведенні її у стан готовності до застосування за призначенням, підтримання системи у стані готовності, використання за призначенням, зберігання і транспортування.

7.2. Види й етапи експлуатації мехатронних систем

Експлуатація мехатронних систем може бути [21, 26, 29]: штатною, дослідною, підконтрольною, лідерною.

Штатна — експлуатація мехатронної системи відповідно до вимог експлуатаційної документації, затвердженої в установленному порядку.

Дослідна — експлуатація заданої кількості виробів, що здійснюється за спеціальною програмою з метою вдосконалення системи експлуатації з урахуванням реальних умов експлуатації, контролю в цих умовах

технічних характеристик вузлів МС, а також набування досвіду експлуатації в різних умовах.

Підконтрольна — штатна експлуатація заданої кількості виробів, що супроводжується додатковим контролем і обліком їхнього технічного стану з метою отримання достовірнішої інформації про змінення якісних показників технічного стану вузлів МС в умовах експлуатації.

Лідерна — штатна експлуатація заданої кількості виробів, виділених для інтенсивнішого витрачання ресурсу порівняно з іншими однотипними виробами для отримання випереджувальної інформації про вплив наробку або терміну експлуатації на їхній технічний стан і визначення можливості й умов установлення нових значень показників надійності.

Згідно з означенням терміну «експлуатація» можна навести такі етапи експлуатації:

- уведення до експлуатації;
- приведення у готовність вузлів МС;
- підтримка у готовності й використання мехатронних систем за призначенням;
- зберігання й транспортування виробів при експлуатації.

Розглянемо ці етапи більш докладно.

Уведення в експлуатацію — сукупність підготовчих робіт, контролю й приймання виробу (МС) відповідно до встановлених вимог і закріплення цього виробу за структурним підрозділом підприємств і відповідальною особою.

Приведення у готовність вузлів МС — комплекс установлених в експлуатаційній документації робіт з приведення виробу у роботоздатний стан і початкове положення для його використання за призначенням.

Підтримка в готовності вузлів МС — комплекс робіт, установлених в експлуатаційній і ремонтній документації і спрямованих на підтримку вузлів МС у встановленому ступені готовності.

Використання мехатронних систем за призначенням — етап експлуатації, упродовж якого вузли МС працюють відповідно до їхнього функціонального призначення.

Зберігання виробів під час експлуатації — знаходження виробів у спеціально відведеному для їх розміщення місці в заданому стані й забезпечення їх збережуваності впродовж установленого терміну.

Короткочасне зберігання — зберігання вузлів МС під час експлуатації до одного року включно.

Тривале зберігання — зберігання виробів під час експлуатації понад один рік.

Транспортування вузлів мехатронних систем під час експлуатації — підготовка, перевезення або переміщення виробів у заданих умовах з використанням транспортних засобів і забезпечення їх зберігання і комплектності.

7.3. Уведення виробів в експлуатацію

Етапами введення виробу в експлуатацію є підготовчі роботи, контроль і приймання виробів, закріплення виробів за виробничим підрозділом підприємства і посадовцями та дослідна експлуатація. Розглянемо більш детально зміст підготовчих робіт, вхідного контролю, прийняття і закріплення вузлів МС.

Під час підготовчих робіт на підприємстві призначається комісія з прийняття, вивчається зразок, вузли МС розвантажуються, транспортуються і комплектуються.

При контролі і прийнятті складових МС (виробів) передбачається перевірка відповідності кількості пломб кількості пакувальних місць; комплектності виробу й запасного майна і приладдя (ЗМП) на нього; наявності мастильних матеріалів, спеціальних гум і їх якості; стану елементів і вузлів, якості фарбування й антикорозійного покриття; технічного стану виробу і його складових частин; наявності, повноти і якості заповнення документації; функціонування вузлів МС.

Виріб за виробничим підрозділом КІВ і обслуговим персоналом закріплюється відповідно до наказу керівника (директора) підприємства, у якому визначаються: найменування виробу і його штатне призначення; заводський номер; запас або кількість використаного ресурсу; умовний державний номер виробу; назва структурного підрозділу КІВ і прізвища посадовців, за якими закріплено виріб. Виріб має бути введено в експлуатацію не пізніше 10 днів з моменту передання його на підприємство.

Під час введення в експлуатацію вузлів мехатронних систем вирішуються такі основні завдання [21, 29].

1. Будівництво технічних споруд для розміщення основної і допоміжної апаратури вузлів МС, яке здійснюється відповідно до діючих будівельних норм і правил за типовими або індивідуальними проектами.

2. Прийняття споруд під монтаж і монтаж забезпечувального й допоміжного устаткування (технічних систем, електроустаткування і т. ін.).

3. Постачання вузлів МС на місце монтажу, організація її тимчасового зберігання, підготовка до монтажу і монтаж. Монтаж мехатронної системи (комплекса) здійснюється відповідно до плану її розміщення в технічній будівлі або споруді з дотриманням вимог експлуатаційної і нормативної документації.

Під час розміщення засобів МС мають забезпечуватися зручність і безпека обслуговування; вільний доступ для огляду і ремонту апаратури й устаткування, відкриття дверей, зняття кожухів і блоків апаратури; мінімальна довжина дротів електроживлення, пневмо- і гідрукавів; нормальна освітленість робочого місця; віддалення вузлів МС від опалювальних приладів на відповідну відстань.

4. Регулювання і налагодження окремих блоків, пристроїв і підсистем МС. Унаслідок проведення цих робіт добиваються повної відповідності усіх параметрів і характеристик вимогам експлуатаційної документації.

5. Стикування вузлів МС із суміжними системами (лініями зв'язку й керування, засобами оброблення й відображення інформації та ін.).

6. Автономні перевірки вузлів МС, які проводять зазвичай з допомогою штатних вбудованих імітаторів, дають змогу перевірити якість функціонування апаратури й міру відповідності її параметрів і характеристик вимогам експлуатаційної документації.

7. Комплексна перевірка мехатронної системи, під час якої визначаються якість виконаних робіт і їх відповідність проекту і затвердженим нормам; робляться контрольні вимірювання, результати яких дають змогу встановити міру відповідності основних параметрів і технічних характеристик значенням, наведеним в експлуатаційній документації.

8. Перевірка функціонування вузлів МС при обслуговуванні реальних об'єктів (при реалізації відповідного технологічного процесу), що дає найбільш об'єктивні й повні результати. Під час роботи з реальним об'єктом перевіряються відповідність основних технічних характеристик вимогам експлуатаційної документації; правильність функціонування як окремих пристроїв, так і мехатронної системи в цілому, правильність спряження й узгодження МС із суміжними системами; систематичні, випадкові й динамічні похибки; надійність виконання технологічних операцій тощо.

Увесь період введення МС в експлуатацію використовують для навчання обслугового персоналу, який буде експлуатувати цю МС, складати іспит зі знань посадових обов'язків, правил експлуатації, правил і заходів безпеки й отримує допуск до самостійної роботи.

Період уведення в експлуатацію закінчується усуненням усіх недоліків, виявлених під час комплексних перевірок, і переведенням МС до дослідної експлуатації.

Дослідна експлуатація є початковим періодом процесу експлуатації, на якому здійснюється комплексна перевірка готовності мехатронної системи (комплексу) до здачі в технічну експлуатацію.

У цей період разом із застосуванням МС за призначенням робиться перевірка й уточнення технічних і експлуатаційних характеристик у реальних умовах експлуатації, доведення числових величин цих характеристик до значень, установлених у технічних умовах або інших експлуатаційних документах.

Під час дослідної експлуатації робиться також доопрацювання й уточнення експлуатаційної документації, відпрацювання і уточнення системи експлуатації. Після виконання усіх завдань дослідної експлуатації МС передається на етап технічної експлуатації.

7.4. Заходи з підтримки вузлів мехатронних систем у готовності до застосування

Технічна експлуатація — це основний період експлуатації МС. У цей період єдиною метою експлуатації є застосування МС за їх прямим призначенням. Тривалість етапу визначається встановленим терміном служби МС, який залежить від якості системи і насамперед від її надійності, умов експлуатації, кваліфікації обслуговуєного персоналу, якості робіт і заходів, що проводяться в цей період з метою підтримки надійності й готовності апаратури на заданому рівні, та від інших чинників.

Основною метою технічної експлуатації є застосування МС за прямим призначенням. Якби МС мали абсолютну надійність, то в період технічної експлуатації необхідно було б проводити тільки підготовку МС до застосування і застосування їх за призначенням. Проте в цей період у складових МС (виконавчих пристроях, апаратно-програмних засобах, датчиках, каналах передачі інформації) виникають несправності, має місце вихід параметрів елементів і пристроїв за межі допусків і т. ін. Тому для вирішення головного завдання технічної експлуатації із заданою ефективністю здійснюються деякі інші роботи й заходи, спрямовані на забезпечення необхідної надійності, готовності й збережаності мехатронних систем. Етапи технічної експлуатації мехатронних систем показано на рис. 7.1.



Рис. 7.1. Зміст технічної експлуатації мехатронних систем

Протягом періоду технічної експлуатації здійснюється також комплекс організаційних заходів з метою забезпечення необхідного рівня надійності й готовності МС, а також заданої ефективності їх застосування за призначенням.

Застосування МС за призначенням — це сукупність робіт, що виконує обслуговий персонал. Обсяг робіт і їх зміст для конкретних МС і об'єктів обслуговування (технологічних процесів) установлюється в експлуатаційній документації [10, 12, 19]. До таких робіт належать, наприклад, оброблення деталей, нанесення покриття, транспортні операції; вимірювання параметрів руху об'єкта (технологічного процесу) (координат, швидкості й прискорення тощо); приймання від об'єкта телеметричної інформації (інформації стану) передання на об'єкт інформації керування; реєстрація інформації стану, її попереднє оброблення і передача лініями зв'язку на верхні рівні комп'ютерно-інтегрованого виробництва [8, 10] тощо.

Перевірка мехатронної системи — це сукупність робіт, що проводить обслуговий персонал з метою виявлення істинного технічного стану апаратно-програмних засобів. За результатами перевірки встановлюється, чи є працездатною МС. Якщо вона не є працездатною, то визначаються заходи з відновлення працездатності, які здійснюються під час підготовки МС до застосування.

Підготовка МС до застосування за призначенням — це сукупність робіт операторів з установлення і введення в апаратуру технологічних та інших даних, необхідних для обслуговування об'єкта керування (технологічного процесу). Етап підготовки МС до застосування може мати характерні особливості, що впливає на її експлуатацію. Наприклад, МС у режимі чергування перебуває послідовно у декількох станах готовності перед застосуванням за призначенням.

Кожен ступінь готовності в системі людина — машина характеризується певним станом складових МС і обслугового персоналу. Ці стани (ступені готовності) визначаються експлуатаційною документацією. Для систем таких класів етап підготовки буде пов'язаний з переходом їх з одного ступеня готовності до іншого.

Обсяг і зміст робіт, які проводяться в цьому випадку, залежать від встановленого ступеня готовності і наводяться в експлуатаційній документації. Розглянуті вище етапи є головною складовою частиною технічної експлуатації — забезпечення робіт з обслуговування певних об'єктів.

Другою складовою частиною технічної експлуатації є підтримання надійності й готовності МС на заданому рівні, які досягаються внаслідок якісного і своєчасного технічного обслуговування й ремонту МС, правильної організації їх зберігання, а також проведенням деяких організаційних заходів.

Технічне обслуговування (ТО) — це комплекс робіт, що проводить обслуговий персонал з метою підтримки справності або тільки працездатності системи при підготовці й використанні її за призначенням, а також при зберіганні й транспортуванні [28]. Головною метою технічного обслуговування є підтримка МС у справному стані й готовності їх до застосування за призначенням із заданою ефективністю.

Ремонт — це комплекс робіт, що проводить обслуговий персонал або ремонтні органи для підтримання або відновлення працездатності МС [14, 15, 26, 28]. Залежно від обсягу і змісту виконуваних робіт ремонт може бути *поточним (дрібним), середнім і капітальним* [21, 26]. Поточний ремонт виконується відразу ж після виявлення несправності і зазвичай силами штатного персоналу. Унаслідок поточного ремонту відновлюється працездатність вузлів МС.

Середній і капітальний ремонти характеризуються великими трудовитратами, складністю робіт і значною їх тривалістю. Ці види ремонту виконують ремонтні органи або підприємства-виготовлювачі вузлів МС [28]. Після виконання середнього (капітального) ремонту відбувається збільшення технічного ресурсу МС.

Під *зберіганням* МС розуміється підтримка їх у технічно справному стані впродовж установленого терміну до застосування за призначенням або в інтервали часу, не пов'язані з підготовкою і застосуванням МС за призначенням [21]. Зберігатися вузли МС можуть на складах, у робочих приміщеннях (цехах) тощо.

Під час зберігання має бути визначено й створено найбільш сприятливі умови утримання засобів МС, за яких забезпечується збереження роботоздатності (надійності), стабільність характеристик і параметрів.

Важливе значення у підтримці надійності й готовності вузлів мехатронних систем на заданому рівні мають організаційні заходи, основними з яких є такі [16, 21, 26, 29]:

- планування експлуатації (застосування за призначенням, технічного обслуговування, ремонту, матеріально-технічного забезпечення і т. ін.);
- метрологічне забезпечення МС і контрольно-вимірювальних приладів;
- збір і оброблення статистичних даних про експлуатаційні показники (надійність, готовність і т. ін.), які отримують під час експлуатації, і розроблення на їх основі заходів з удосконалення системи технічного обслуговування й ремонту, а також з підвищення готовності МС;
- рекламаційна робота;
- організація добору і професійної підготовки обслугового персоналу й операторів МС;
- винахідницька й раціоналізаторська робота, що спрямована на вдосконалення способів і методів технічного обслуговування й ремонту, розроблення технічних засобів навчання операторів і т. ін.

Контрольні запитання

1. Дайте означення системи експлуатації виробів.
2. Назвіть етапи експлуатації мехатронних систем.
3. У чому полягає технічна експлуатація мехатронних систем?
4. Дайте означення дослідної експлуатації.
5. Яким чином вузли МС вводять в експлуатацію?
6. Назвіть заходи з підтримки виробу в готовності до застосування за призначенням.
7. Яким чином здійснюють зберігання виробів при експлуатації?
8. Які основні завдання вирішують під час уведення в експлуатацію вузлів мехатронних систем?
9. Які вимоги виконуються при розміщенні засобів мехатронних систем?

8. ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ

8.1. Технічне обслуговування і його види

Технічне обслуговування (ТО) — це комплекс заходів і робіт з підтримки справності й працездатності виробів на усіх етапах експлуатації, який містить контроль готовності виробу до використання за призначенням і усунення несправностей; регламенти; доопрацювання; технічні ревізії; держнагляд; метрологічне забезпечення.

Єдина система ТО є планово-запобіжною, ґрунтується на обов'язковому виконанні видів ТО залежно від часу напрацювання або календарних термінів з урахуванням умов експлуатації.

Технічне обслуговування є комплексом робіт, спрямованих на підтримку справності або тільки працездатності МС при підготовці й використанні за призначенням, зберіганні й транспортуванні:

– профілактичні роботи, спрямовані на запобігання відмовам (заміна елементів, мастильні й кріпильні роботи й т. ін.);

– роботи, пов'язані з контролем технічного стану, метою яких є перевірка відповідності параметрів, що характеризують відповідність працездатного стану МС вимогам нормативно-технічної документації (формуляра, паспорта тощо);

– регульовальні й настроювальні роботи, призначені для доведення параметрів МС (блоків, вузлів та ін.) до значень, установлених в нормативно-технічній документації;

– поточний ремонт, спрямований на відновлення працездатності або справності вузлів МС шляхом усунення відмов і ушкоджень.

Комплекс взаємозв'язаних положень і норм, за якими визначають організацію і порядок проведення робіт з технічного обслуговування і ремонту для заданих умов експлуатації з метою забезпечення показників якості, передбачених в нормативно-технічній документації, називають системою технічного обслуговування і ремонту.

Залежно від умов експлуатації, конструкційних особливостей апаратури і характеру відмов при організації ТО використовують три принципи [21, 29]: *календарний, напрацювання і змішаний (комбінований)*.

Календарний принцип полягає в тому, що ТО назначається і проводиться після закінчення певного календарного терміну (день, тиждень, місяць, квартал і т. ін.), незалежно від інтенсивності використання МС і напрацювання [26]. Цей принцип застосовують для вузлів МС, відмови якої визначаються головним чином процесами старіння матеріалів і яка має такі характерні стани: тривалий період зберігання; короткотермінове застосування, коли процес експлуатації складається з циклів, що чергуються; зберігання; перебування в резерві.

При календарному принципі розрізняють: щоденні огляди, щотижневі, щомісячні, щоквартальні, піврічні (сезонні) і річні ТО. Обсяг і зміст робіт для кожного виду ТО визначають в експлуатаційній документації (інструкції з технічного обслуговування, інструкції з експлуатації та ін.) [21–29]. Календарний принцип організації ТО має широке застосування, оскільки дає змогу чітко, централізовано планувати технічне обслуговування на тривалий період з урахуванням обстановки, що складається на виробництві.

Принцип напрацювання полягає у призначенні термінів проведення ТО після досягнення вузлами МС певного напрацювання [29]. При цьому напрацювання може обчислюватися в годинах роботи, кількості включень, циклах тощо. Принцип напрацювання (його іноді називають регламентним) можна використовувати для організації в тих випадках, коли відмови сталися через зношення деталей, вузли МС працюють в тяжких умовах, що значно відрізняються від нормальних, або тривалий час працюють без перерви (системи безперервного використання). Для призначення термінів ТО електромеханічних і механічних пристроїв (електродвигуни, пневмо- і гідроприводи), характер зношення яких є явно вираженим, застосовується принцип напрацювання.

Змішаний (комбінований) принцип організації ТО застосовується для вузлів МС, у яких відмови обумовлені процесами як зношення, так і старіння [21].

Технічне обслуговування, побудоване на основі одного з розглянутих вище принципів, може мати *плановий або неплановий характер*.

Планове ТО передбачено в нормативній документації і здійснюється в плановому порядку, його називають також періодичним, оскільки характеризується таким показником, як періодичність.

Непланове (неперіодичне) ТО — це обслуговування, яке також передбачено в нормативній документації, але його виконують поза планом. Непланове ТО проводять у випадку виникнення відмов з метою усунення їх причин і відновлення роботоздатності МС, перед транспортуванням засобів МС і після нього, при переведенні вузлів МС з одного стану готовності в інший і т. ін.

В організації ТО вирізняють три етапи: *підготовчий, основний і завершальний* [26, 29].

На підготовчому етапі виконуються такі основні завдання:

- планування робіт з ТО і поставлення завдань виконавцям;
- підготовка обслугового персоналу (вивчення інструкцій, технічних описів, правил і заходів безпеки, відпрацювання практичних навичок на тренажерах і т. ін.);
- підготовка контрольно-вимірювальних приладів, інструменту, витратних матеріалів;
- підготовка засобів МС до проведення ТО;
- проведення організаційно-контрольних заходів (контроль знань персоналу, стану контрольно-вимірювальних приладів і т. ін.).

На основному етапі відповідно до плану (сіткового графіка, технологічних карт та ін.) виконується вся сукупність робіт за цим видом ТО. Вирішуються також завдання контролю повноти і якості проведення ТО і забезпечення заходів безпеки.

На завершальному етапі вузли МС переводять у заданий стан, записують до облікової документації відомості про виконані роботи й виявлені несправності, прибирають приміщення й підводять підсумки.

8.2. Показники якості технічного обслуговування

Показники якості ТО — це кількісні характеристики ефективності заходів і робіт, які виконуються при проведенні того чи іншого виду ТО [21 — 29]. З їх допомогою можна оцінювати рівень підготовки і якість організації робіт обслугового персоналу.

Для оцінювання якості ТО використовуються ймовірнісні, часові й вартісні показники. Розглянемо найбільш важливі з них.

1. Імовірність виконання ТО протягом заданого часу — це ймовірність того, що дійсна тривалість певного ТО не перевищить заданий термін часу. Аналітично це можна подати як функцію розподілу часу виконання технічного обслуговування:

$$P_{TO}(t) = P\{f_{TO} \leq t\}. \quad (8.1)$$

Якщо відомо щільність розподілу тривалості ТО $f_{TO}(t)$, то $P_{TO}(t) = \int_0^t f_{TO}(\tau) d\tau$. За показовим законом розподілу

$$f_{TO}(t) = \beta \exp\{-\beta t\},$$

де $\beta = \frac{1}{T_{TO_{сер}}}$ ($T_{TO_{сер}}$ – середній час виконання певного виду ТО).

Звідси отримаємо

$$P_{TO}(t) = 1 - \exp\{-\beta t\}. \quad (8.2)$$

2. Середній час виконання певного виду ТО

$$\hat{T}_{TO_{сер}} = n^{-1} \sum_{i=1}^n t_{TO_i}, \quad (8.3)$$

де t_{TO_i} — тривалість певного ТО на i -й МС;

n — кількість однотипних МС.

3. Сумарна тривалість ТО за певний період експлуатації (місяць, рік тощо)

$$T_{TO_c} = \sum_{i=1}^m t_{TO_i}, \quad (8.4)$$

де t_{TO_i} — тривалість i -го ТО;

m — кількість ТО, проведених за розглядуваний період експлуатації.

Питома сумарна тривалість ТО визначається як відношення сумарної тривалості ТО до напрацювання МС за один і той самий період експлуатації:

$$Y_{TO} = T_{TO_c} / T_p. \quad (8.5)$$

4. Сумарна трудомісткість ТО — це сумарні трудовитрати на проведення технічного обслуговування МС за певний період експлуатації (трудомісткість вимірюється в людино-годинах):

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \theta_{TO_i}, \quad (8.6)$$

де θ_{TO_i} — трудовитрати на проведення i -го ТО;

n — кількість ТО за певний період експлуатації.

5. Середня сумарна трудомісткість ТО — це математичне сподівання сумарних трудовитрат на проведення ТО за певний період експлуатації:

$$\theta_{TO_{сер}} = M[\theta_{TO}]. \quad (8.7)$$

6. Питома сумарна трудомісткість ТО

$$Y_{\theta} = \theta_{TO_{сер}} / M[T_p]. \quad (8.8)$$

де $M [T_p]$ — математичне сподівання сумарного наробітку за певний період експлуатації.

7. Сумарна вартість ТО за певний період експлуатації

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_i, \quad (8.9)$$

де C_i — вартість проведення i -го ТО;

n — кількість ТО за певний період експлуатації.

За аналогією з показниками трудомісткості ТО вводяться такі показники, як середня сумарна вартість і питома сумарна вартість ТО.

Для оцінювання якості ТО використовують:

— коефіцієнт ефективності профілактики

$$K_{e.п} = \frac{n_e}{n_e + n_n}, \quad (8.10)$$

де n_e — кількість відвернутих відмов під час профілактики (ТО) за певний період експлуатації;

n_n — кількість невідвернутих відмов за той самий період експлуатації;

— коефіцієнт технічного використання, значення якого обчислюють за статистичними даними,

$$K_{т.в} = \frac{T_p}{T_p + T_{ТО} + T_{рем}}, \quad (8.11)$$

де T_p — сумарний наробок за певний календарний термін;

T_{TO} — сумарний час простоїв через планове й непланове ТО;

$T_{рем}$ — сумарний час простоїв через планові й непланові ремонти.

Значення T_p , T_{TO} і $T_{рем}$ зазвичай беруться за один і той самий календарний термін.

Характеристику єдиної системи технічного обслуговування вузлів мехатронних систем, які використовуються за призначенням, наведено в табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Вид ТО	Призначення виду ТО	Періодичність проведення ТО	Хто проводить. Керівні документи
Контрольний огляд	Перевірка технічного стану на місцях застосування	Перед застосуванням, при замінах вузлів	Обслуговий персонал. Експлуатаційна документація
Щоденне (поточне) ТО	Підготовка виробу до використання, усунення недоліків	Після використання виробу, але не рідше одного разу за два тижні, якщо виріб не використовувався	Обслуговий персонал. Експлуатаційна документація
ТО-1	Підтримка виробу у справному стані до чергового номерного технічного обслуговування	Після досягнення встановленого наробку, але не рідше одного разу за рік. Перед початком короткотермінового зберігання	Обслуговий персонал за участі працівників ремонтних підрозділів, група ремонтно-налагоджувальних робіт. Експлуатаційна документація
ТО-2	Підтримка виробу у справному стані до чергового номерного технічного обслуговування	Після досягнення встановленого документами наробку, але не рідше одного разу за два роки. Перед початком тривалого зберігання	Працівники ремонтних підрозділів, група ремонтно-налагоджувальних робіт із залученням обслугового персоналу. Експлуатаційна документація
Сезонне технічне обслуговування (СТО)	Підготовка виробу до осінньо-зимового й весняно-літнього періодів експлуатації	Двічі за рік у терміни, зазначені в керівних документах.	Працівники ремонтних підрозділів, група ремонтно-налагоджувальних робіт із залученням обслугового персоналу. Експлуатаційна документація

8.3. Контроль технічного стану мехатронних систем

Контроль технічного стану є найважливішою роботою серед тих, що проводяться на всіх етапах експлуатації з метою підтримки заданого рівня надійності й готовності МС [21, 25, 29]. Рішення щодо технічного стану МС приймається за результатами вимірювань і контролю деякої сукупності параметрів, що визначають працездатність МС у цілому і її окремих вузлів. Склад параметрів і вимоги до них (абсолютні значення, допуски, характер зміни й т. ін.) визначаються експлуатаційною документацією.

Для контролю технічного стану МС використовують контрольно-вимірвальну апаратуру (КВА), яка може бути як вбудованою, тобто складати єдине ціле з МС, так і автономною, тобто такою, що підмикається до МС (об'єкта контролю) тільки на час вимірювання або контролю.

Під час контролю й оцінювання технічного стану й організації експлуатації мехатронних систем (комплексів) перевіряють:

- стан обліку і відповідність облікових даних фактичному стану;
- справність ЗМП (контроль технічного стану й комплектності);
- якість і своєчасність проведення технічних обслуговувань;
- засоби вимірювання, електроустановки і об'єкти держнагляду;
- своєчасність, якість і повноту проведення доопрацювань вузлів МС;
- стан формуляра (паспорта), правильність використання ресурсу і його запас;
- знання обслуговим персоналом устрою і правил експлуатації вузлів мехатронних систем;
- організацію зберігання вузлів мехатронних систем.

Процес контролю може бути *автоматичним, автоматизованим і неавтоматизованим* [9, 12, 14, 18].

У новітніх розробках широко застосовуються автоматичні системи контролю, які істотно підвищують рівень надійності й готовності вузлів МС.

У системах і комплексах попередніх випусків зазвичай поєднано неавтоматизовану вбудовану апаратуру контролю й автономні переносні засоби вимірювання й контролю, комплект яких поставляється на підприємства разом з МС.

Контроль параметрів здійснюють шляхом вимірювання їхніх абсолютних (відносних) значень (кількісний контроль), або шляхом оцінювання знаходження цих параметрів у межах заданих допусків (допускний контроль) [14, 29]. При допускному контролі інформація про результати контролю надається словами «Придатний», «Не придатний», «Норма», «Не норма» та ін.

Залежно від завдань, що вирішуються при оцінюванні технічного стану вузлів МС, розрізняють контроль працездатності, діагностичний і прогнозний контроль [14].

Контроль працездатності здійснюють під час підготовки МС до застосування, ТО і ремонту, періодично — під час зберігання й транспортування, а також під час проведення технічних оглядів. Основне завдання, яке вирішується при цьому, зводиться до визначення технічного стану МС у цілому і ступеня її готовності до застосування за призначенням під час контролю. Під час контролю працездатності здійснюється також налагодження і регулювання вузлів МС. Основними показниками якості процесу контролю є тривалість контролю, повнота (глибина) контролю і достовірність результатів контролю [9, 14].

Час контролю — це час, що витрачається на контроль заданої сукупності параметрів у реальних умовах експлуатації і є випадковою величиною, яка характеризується щільністю розподілу часу контролю $f_k(t_k)$. На практиці як часовий показник, що характеризує процес контролю, використовують математичне сподівання, або середній час контролю

$$T_{k.сер} = \int_0^{\infty} t_k f_k(t_k) dt_k. \quad (8.12)$$

За статистичними даними, отриманими під час експлуатації, середній час контролю можна визначити за таким співвідношенням:

$$\hat{T}_{k.сер} = m^{-1} \sum_{i=1}^m T_{k_i}, \quad (8.13)$$

де T_{k_i} — час, що витрачається на контроль i -ї МС (i -й контроль);

m — кількість однотипних МС (контролів).

Повнота (глибина) контролю є характеристикою міри охоплення засобів МС контролем. Показник повноти (глибини) контролю можна визначити, як відношення кількості контрольованих параметрів N_k до загальної кількості параметрів N_0 , що визначають працездатність МС:

$$P_k = N_k / N_0. \quad (8.14)$$

Достовірність процесу контролю відображає міру довіри до рішення щодо стану МС, прийнятого за результатами контролю. Невизначеність результатів контролю обумовлена похибками вимірювань, які можуть призвести до виникнення помилок двох видів при прийнятті рішення щодо стану МС за результатами контролю: помилка першого роду — дійсно справну МС вважають за несправну, помилка другого роду — несправну МС вважають за справну.

За показник достовірності D візьмемо відношення значення ймовірності істинного стану МС P_c до значення ймовірності стану, отриманого за

результатами контролю P_k з урахуванням імовірності виникнення помилок першого та другого роду.

Перед контролем технічного стану МС зазвичай проводять контроль КВА з метою визначення її справності й придатності для вимірювань. Тоді достовірність результатів контролю буде визначатися надійністю об'єкта контролю (МС) і похибками контрольно-вимірювано апаратури.

Для визначення показника достовірності контролю розглянемо граф станів МС і процесу прийняття рішення (рис. 8.1) [9, 14, 21].

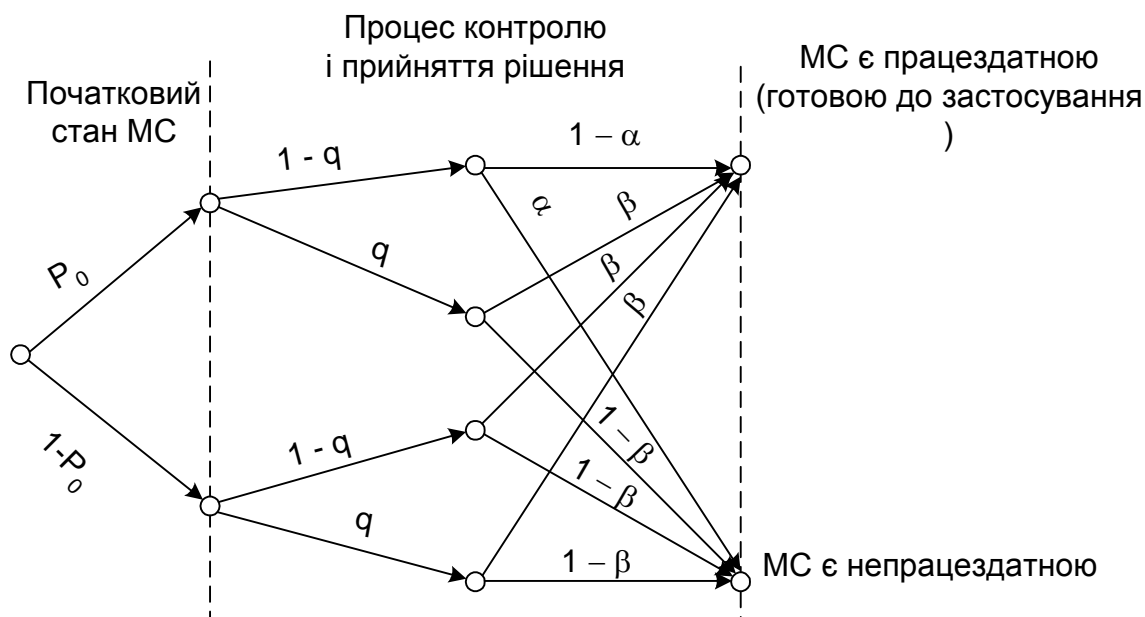


Рис. 8.1. Граф прийняття рішення за результатами контролю технічного стану МС

На графі наведено такі позначення:

P_0 — імовірність справного стану МС перед початком контролю;

q — імовірність відмови МС під час контролю;

α — імовірність того, що справний стан МС вважається несправним;

β — імовірність того, що несправний стан МС вважається справним.

Уважатимемо, що всі зазначені ймовірності є незалежними. З логічних міркувань і наведеного графа випливає, що значення ймовірності справної мехатронної системи

$$P_H = P_0(1-q)(1-\alpha). \quad (8.15)$$

Імовірність того, що за результатами контролю МС буде визнано несправною, дорівнює сумі ймовірностей позитивних результатів при прийнятті рішення з урахуванням можливих станів МС і помилок першого і другого роду:

$$P_k = P_0[(1-q)(1-\alpha) + q\beta] + (1-P_0)[(1-q)\beta + q\beta]. \quad (8.16)$$

Після перетворення отримаємо

$$P_k = (1-q)[P_0(1-\alpha) + (1-P_0)\beta] + q\beta. \quad (8.17)$$

Тоді згідно з означенням показник достовірності

$$D = \frac{P_H}{P_k} = \frac{P_0(1-q)(1-\alpha)}{[P_0(1-\alpha) + (1-P_0)\beta] + q\beta}. \quad (8.18)$$

У тих випадках, коли час контролю є невеликим і перевірки проводяться в режимі функціонування МС, імовірність відмови q під час контролю є незначною і її можна взяти такою, що дорівнює нулю ($q = 0$). Тоді достовірність контролю

$$D = \frac{P_0(1-\alpha)}{P_0(1-\alpha) + (1-P_0)\beta}. \quad (8.19)$$

Достовірність результату контролю за інших рівних умов можна підвищити шляхом проведення багатократних перевірок. Якщо проводиться m циклів контролю, при яких у k випадках складається висновок про справний стан МС, то при $q = 0$ отримаємо

$$D = \frac{P_0 C_m^k (1-\alpha)^k \alpha^{m-k}}{P_0 C_m^k (1-\alpha)^k \alpha^{m-k} + (1-P_0) C_m^k \beta^k (1-\beta)^{m-k}}. \quad (8.20)$$

Діагностичний контроль проводять з метою пошуку несправностей і встановлення причин їх виникнення [9, 14]. Необхідність у діагностичному контролі виникає тоді, коли під час контролю працездатності або застосування МС за призначенням виникає відмова або виявляється, що система не відповідає заданим вимогам.

Одним із найважливіших завдань, що вирішуються при проведенні діагностичного контролю, є вибір такої стратегії (програми) пошуку несправностей, за якої забезпечується мінімальний час виявлення несправного елемента [14]. Програма пошуку несправностей залежить від прийнятого методу. Сьогодні найбільшого поширення набули метод послідовних поелементних перевірок, метод послідовних групових перевірок і комбінаційний метод [21, 22].

Суть методів послідовних поелементних перевірок полягає в тому, що несправність шукають шляхом перевірки елементів системи по одному в певній, заздалегідь установленій послідовності. При виявленні несправного елемента пошук припиняють, замінюють елемент, а потім проводять комплексну перевірку працездатності усієї системи.

Якщо під час комплексної перевірки виявилось, що роботоздатність системи не відновлено, то продовжують пошук наступної несправності з тієї позиції, на якій було виявлено несправний елемент. Після усунення другої несправності знову проводять комплексну перевірку МС на роботоздатність і за наявності ще однієї несправності продовжують її пошук описаним вище чином до відновлення роботоздатності МС.

Оптимальну програму пошуку несправності, яка мінімізує середній час пошуку, можна розробити, якщо відомо середній час перевірки елементів t_i ($i = 1, 2, \dots, n$) і ймовірність відмов МС при відмові кожного із n елементів q_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Залежно від значень q_i і t_i застосовують такі методи.

1. Метод «час — ймовірність». При $q_1 \neq q_2 \neq \dots \neq q_n$, $t_1 \neq t_2 \neq \dots \neq t_n$ має виконуватися нерівність

$$q_1/t_1 > q_2/t_2 > \dots > q_3/t_3 > \dots > q_n/t_n,$$

де індекси 1, 2, ..., n визначають черговість перевірки елементів.

2. Метод максимальної ймовірності. При $t_1 = t_2 = \dots = t_n$, $q_1 \neq q_2 \neq \dots \neq q_n$ розпочати перевірку необхідно з того елемента, що має найбільшу умовну ймовірність відмови, а всю послідовність перевірок необхідно вибирати з умови

$$q_1 > q_2 > \dots > q_i > \dots > q_n.$$

3. Метод мінімального часу. При $q_1 = q_2 = \dots = q_i = \dots = q_n$, $t_1 \neq t_2 \neq \dots \neq t_n$ має виконуватись умова

$$t_1 < t_2 < \dots < t_n,$$

а контроль необхідно починати з елементів, які потребують найменшого часу перевірки працездатності.

4. Метод випадкових випробувань. При $q_1 = q_2 = \dots = q_3 = \dots = q_n$, $t_1 = t_2 = \dots = t_n$ пошук несправності ведеться у випадковому порядку.

Методи послідовних поелементних перевірок можна застосовувати у будь-яких функціональних схемах МС і варіантах її конструкції [24], що є їх перевагою. Недоліком цих методів є порівняно значна кількість перевірок, що призводить до великого часу пошуку місця виникнення відмови навіть в оптимальних програмах.

Суть методу послідовних групових перевірок полягає в тому, що вся система розбивається на окремі групи елементів — пристрої, блоки,

вузли тощо [21, 24]. Найчастіше таке розбиття визначається самою конструкцією вузлів мехатронних систем.

Пошук несправності розпочинається з вимірювання одного або декількох параметрів — так виявляється група елементів, у якій існує несправність. Потім шляхом послідовного ділення цієї групи на підгрупи область несправної частини зменшується доти, доки не буде виявлено несправний елемент.

Основне завдання, яке виконується при розробленні програм пошуку, зводиться до визначення контрольної точки, з якої слід розпочати перевірку груп, і кроків, які необхідно зробити в подальшому після аналізу результатів контролю, щоб отримати мінімальний час пошуку.

Під час експлуатації МС КІВ для вирішення цього завдання застосовують три способи розбиття структурної схеми МС на групи елементів: середньої точки, половинної ймовірності й половинного часу [9, 14, 16, 21, 29].

Спосіб середньої точки полягає в тому, що система розбивається на дві рівні частини і вимірювання параметра робиться в середній точці. Визначивши групу, що містить несправний елемент, знову розбивають її на дві рівні частини і так далі до визначення елемента, що відмовив.

Цей спосіб дає оптимальний результат у тому випадку, якщо елементи МС є рівнонадійними і середній час перевірок груп елементів — приблизно однаковим. В інших випадках мінімізується тільки кількість перевірок, необхідних для виявлення елемента, який відмовив.

Спосіб половинної ймовірності полягає в тому, що систему послідовно поділяють на дві однакові частини таким чином, щоб значення ймовірностей відмов у кожній частині були приблизно однаковими.

Спосіб половинного часу полягає в тому, що мехатронну систему послідовно поділяють на дві частини таким чином, щоб середній час перевірок у кожній частині був приблизно однаковим.

Суть комбінаційного методу полягає в тому, що під час пошуку несправностей вимірюють певну сукупність параметрів і за результатами цих вимірювань роблять висновок про несправність елемента. Аналізують стан системи й приймають рішення після оцінювання усієї сукупності контрольованих параметрів. Послідовність перевірок значення не має. Метод доцільно використовувати для складних багатофункціональних МС із розгалуженою структурою, коли окремі елементи є взаємозв'язаними.

Для встановлення взаємозв'язку між станом елементів системи і значеннями контрольованих параметрів необхідно скласти таблицю, таку, як табл. 8.2 [21, 24]. Правило заповнення таблиці полягає в такому: у таблицю на перетині рядка, що відповідає i -му елементу, і стовпця, що відповідає j -му параметру, ставлять «1», якщо відмова i -го елемента призводить до виходу j -го параметра за поле допуску, і «0», якщо відмова елемента не впливає на значення параметра.

Таблиця 8.2

Елементи	Параметри						Кодове число елемента	
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6	Вихідне	Визначення
E_1	1	0	0	0	1	0	15	15
E_2	0	1	0	1	0	1	246	246
E_3	1	0	1	0	0	0	13	1
E_4	0	1	0	1	1	0	25	25
E_5	0	0	1	0	0	1	36	6
E_6	0	1	0	0	0	1	26	26
E_7	0	1	0	1	0	0	24	24
E_8	0	0	0	0	1	0	5	5
E_9	1	0	1	0	0	1	136	16

Початкове кодове число елемента утворюється з номерів параметрів, які змінюються при його відмові. Якщо отримані кодові числа не містять нулів і комбінацій цифр, що повторюються, то вибрана сукупність параметрів забезпечує однозначний вибір несправного елемента.

Таку сукупність параметрів можна назвати повною, а умову відсутності нулів і кодових чисел, що повторюються, — умовою достатності набору параметрів для пошуку несправного елемента.

Наявність однакових кодових чисел свідчить про існування неоднозначності у виборі несправного елемента, яка виключається додатковим вибором одного або декількох контрольованих параметрів, що по-різному залежать від стану елементів з однаковими кодовими числами. Після вибору додаткових параметрів знову складають таблицю і перевіряють виконання умови достатності набору параметрів.

Повна сукупність параметрів, будучи достатньою, не завжди може бути необхідною. Можливо, що деякі параметри можна виключити з перевірки. Це зменшить час пошуку несправності. Параметр Π_i можна виключити з повної сукупності, якщо після викреслювання i -ї цифри з кодових чисел елементів нові кодові числа, як і раніше, задовольнятимуть умову достатності. Так, наприклад, у табл. 8.2 можна виключити параметр Π_3 .

Нові кодові числа проставляють в останній графі таблиці. Така операція може повторюватися доти, доки виконуватиметься умова достатності.

Для пошуку несправного елемента за допомогою таблиці необхідно у будь-якому порядку проконтролювати повну сукупність параметрів і встановити параметри, що не є нормальними. Потім за кодовим числом визначають несправний елемент. Наприклад, якщо під час перевірки параметри P_2 і P_6 не є нормальними (кодове число 26), а інші — нормальними, то несправним є елемент E_6 .

Для практичної реалізації комбінаційного способу доцільно скласти спеціальну табл. 8.3 [21], де зазначити, при якому поєднанні нормального й ненормального станів параметрів несправним є той чи інший елемент (блок, пристрій, вузол тощо). Така таблиця складається на основі початкової табл. 8.2.

Таблиця 8.3

Стан параметрів					Рішення
P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	
Норма	Не норма	Норма	Норма	Не норма	Несправний E_1
Не норма	Норма	Не норма	Не норма	Норма	Несправний E_2

Комбінаційний спосіб можна застосовувати для пошуку одночасно двох і більше відмов. Необхідна й достатня кількість параметрів для пошуку декількох несправних елементів визначається за викладеною вище методикою.

Для складних вузлів МС кращі результати вдається отримати при комплексному використанні всіх способів пошуку несправностей. При цьому комбінаційний спосіб використовують для визначення несправного пристрою (блока, тракту); спосіб групових перевірок — для пошуку несправного вузла, каскаду; спосіб поелементних перевірок — для відшукування несправних елементів (деталей) у вузлах МС [29].

Після вибору й оптимізації програми необхідно вибрати спосіб перевірки справності конкретного елемента. При експлуатації МС для цієї мети використовують способи зовнішнього огляду, заміни, проміжних вимірювань, характерної ознаки [9, 14, 21, 24, 29].

Спосіб зовнішнього огляду. Шляхом зовнішнього огляду вузлів МС перевіряють стан електричного монтажу (відсутність пошкоджень ізоляції, обривів, замикань, слідів пробоїв), зовнішній вигляд елементів електричних ланцюгів (резисторів, конденсаторів та ін.), наявність

запобіжників і відповідність їх номіналам, світіння ламп, відсутність іскрінь, ступінь нагріву елементів і т. ін. Спосіб є ефективним при існуванні зовнішніх ознак відмов.

Спосіб заміни. Перевірка стану МС за цим способом полягає в тому, що елементи (вузли, блоки, напівпровідникові прилади тощо), які можуть бути несправними, замінюють на справні. Якщо після заміни певного елемента працездатність МС відновлюється, то роблять висновок про те, що замінений елемент є несправним.

Перевага способу — простота реалізації і значна швидкість перевірок. Проте цей спосіб має кілька недоліків, основними з яких є такі: необхідність мати в складі ЗМП велику кількість різноманітних справних елементів, у тому числі вузлів і блоків; відсутність можливості виявлення причин відмов; можливість виведення з ладу справного елемента через неусунення відмови. Ці обставини обмежують область застосування способу. Зазвичай його застосовують тільки тоді, коли елемент, який вважають несправним, є легкоз'ємним і недорогим.

Спосіб проміжних вимірювань. За цим способом з допомогою КВА в певних точках схеми вимірюють значення параметрів системи, блока, каскаду або елемента. Параметрами, що характеризують стан вузлів МС, можуть бути значення напруг або струмів у різних перерізах, опору різних ділянок схеми, частота, спектр сигналу, форма сигналу (осцилограма) і т. ін. Результати вимірювань (спостереження процесу) порівнюють з даними експлуатаційної документації, на основі чого й роблять висновок про стан елемента.

Спосіб характерної ознаки. Суть цього способу полягає в такому: на вхід контрольованого пристрою подається сигнал з певними, заздалегідь заданими характеристиками, за характерними ознаками вихідного сигналу роблять висновок про місце пошкодження (виникнення відмови).

Вибір того чи іншого способу для пошуку несправностей залежить від конкретних умов експлуатації, конструкції апаратури, кваліфікації обслуговуваного персоналу, досвіду роботи й ін.

Прогнозний контроль. Для складних МС, які виконують відповідальні завдання, велике значення має не лише знання їх поточного стану, але й знання його змінень у майбутньому, щоб можна було своєчасно вжити відповідні заходи з попередження відмов. Такими заходами можуть бути, наприклад, своєчасне перемикавання на резерв, своєчасне замінення елементів, перехід на нові режими роботи тощо [21]. Таким чином, вирішується головне завдання етапу експлуатації: забезпечення заданого рівня надійності й готовності мехатронної системи.

Такі завдання вирішуються з допомогою прогнозного контролю, суть якого полягає в тому, що за сукупністю вимірювань у поточний момент часу (або на деякому інтервалі $t + \Delta t$) прогнозується технічний стан МС або окремих її вузлів у майбутньому. Таке прогнозування ґрунтується на

використанні певних взаємозв'язків між вимірюваними параметрами й технічним станом об'єкта.

Прогнозування пов'язане з контролем деякої сукупності прогнозованих параметрів $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, що визначають технічний стан МС. Ці параметри можна подати по-різному: їх значеннями в моменти часу t , законами розподілу, комплексними показниками тощо.

Залежно від наявної інформації можливими є два основні методи прогнозування [14, 21]: аналітичний, який ґрунтується на використанні детермінованих закономірностей, і ймовірнісний, що базується на знанні законів розподілу параметрів, які характеризують працездатність МС.

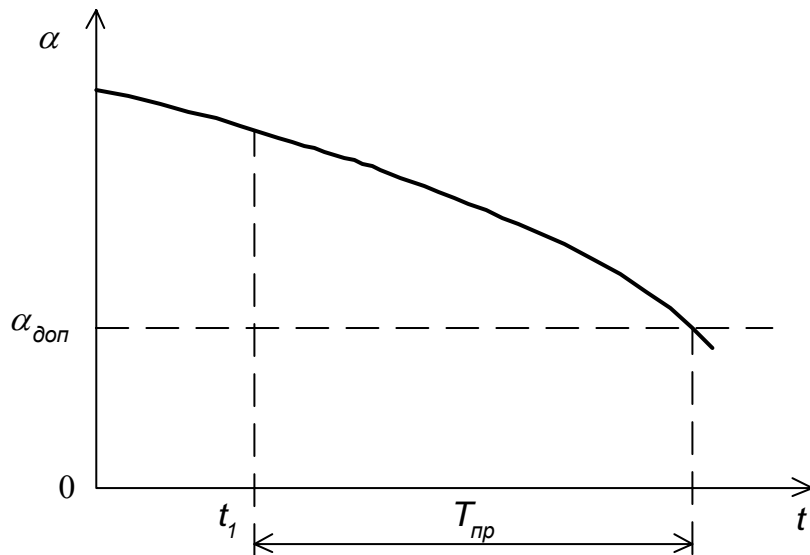
Аналітичне прогнозування застосовують у тих випадках, коли контрольований процес (який характеризує стан МС) можна подати у вигляді багатовимірної функції $F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$, що має назву функції станів [21]. Спостерігаючи цю функцію на інтервалі від 0 до t_n , отримують значення $F(t_0), F(t_1), \dots, F(t_n)$ відповідно в моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n . За результатами оброблення отриманих даних знаходять значення функції стану на таких інтервалах часу: $F(t_{n+1}), F(t_{n+2}), \dots, F(t_{n+m})$ в моменти часу $t_{n+1}, t_{n+2}, \dots, t_{n+m}$.

Завдання прогнозування можна вирішити як у явному вигляді шляхом безпосереднього визначення функції $F(\alpha, t)$, так і опосередковано, коли спочатку знаходять кожний параметр α_i , а потім уже значення функції $F(\alpha, t)$. Така постановка завдання прогнозування є правильною, коли значення функції $F(\alpha, t_0), \dots, F(\alpha, t_n)$ у моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n дають змогу знайти значення $F(\alpha, t_{n+1}), \dots, F(\alpha, t_{n+m})$ в моменти часу $t_{n+1}, t_{n+2}, \dots, t_{n+m}$.

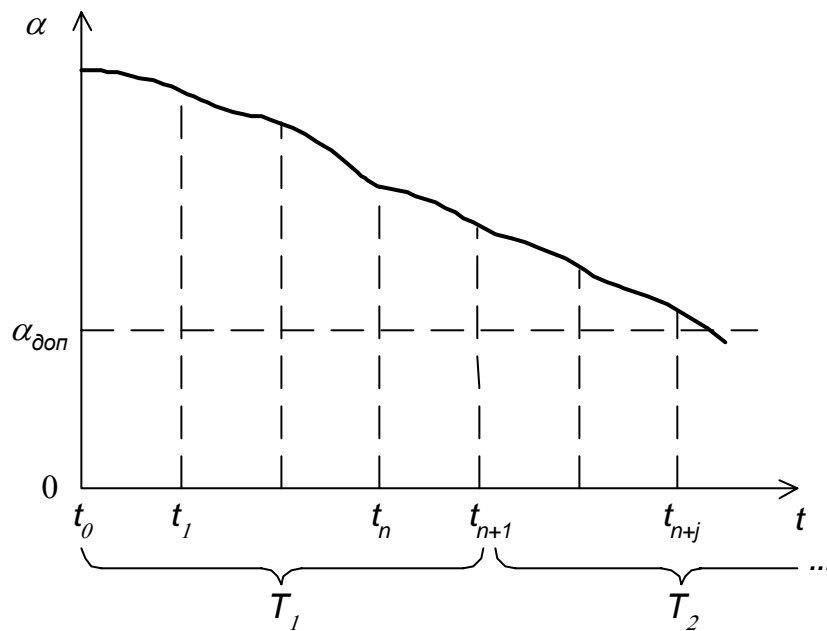
Можливе виконання цієї умови залежить від рівня знань про прогнозований процес, тобто від обсягу даних про процес, отриманих на інтервалі часу T_1 (від 0 до t_n). Ідеальним випадком при цьому є такий, коли існує аналітичний вираз для функції стану $F(\alpha, t)$.

У найпростішому випадку така функція може бути одновимірною (закон змінення прогнозованого параметра в часі $F(\alpha, t) = \alpha(t)$). При такому законі змінення прогнозованого параметра відмова виникає в момент часу t_2 , коли прогнозований параметр досягне граничного значення. Для знаходження інтервалу прогнозування T_{np} за такої умови досить виміряти значення параметра в поточний момент часу t_1 (рис. 8.2, а).

Якщо немає строгого аналітичного виразу для функції стану, то можна скористатися екстраполяційним методом, який ґрунтується на існуванні значень функції $\alpha(t)$ на деякому інтервалі (t_1, t_n) або в деяких точках t_0, t_1, \dots, t_n (рис. 8.2, б). У цьому випадку може бути передбаченим значення $\alpha(t_{n+1})$, найкраще за яким-небудь критерієм, наприклад найменшого значення середньоквадратичної похибки [14]. Якщо передбачене значення $\alpha(t_{n+1}) \geq \alpha_{ep}$, то інтервал прогнозування знаходять за формулою $T_{np} > t_{n+1} - t_n$.



а



б

Рис. 8.2. Аналітичне прогнозування: а — функціональне; б — екстраполяційне

Функції стану також можна знайти за статистичними даними, отриманими під час експлуатації. Прогнозування за екстраполяційним методом здійснюється таким чином [14].

Унаслідок контролю прогнозованого параметра впродовж деякого періоду експлуатації T отримують декілька значень $\alpha(t_0), \alpha(t_1), \dots, \alpha(t_n)$, що відповідають моментам часу t_0, t_1, \dots, t_n , узятим через постійний інтервал Δt (див. рис. 8.2, б).

На основі цих даних обчислюють значення параметра $\alpha(t_{n+1}), \dots, \alpha(t_{n+j}), \dots, \alpha(t_{n+m})$ у майбутні моменти часу $t_{n+1}, \dots, t_{n+j}, \dots, t_{n+m}$ упродовж майбутнього періоду експлуатації T_2 . Для вирішення завдання в цій постановці основним є будівництво аналітичного виразу $F(t)$ для одержання найменшої похибки прогнозу. Ефективність екстраполяційного методу, перевіреного на практиці, виявилася досить високою.

Імовірнісне прогнозування полягає у визначенні ймовірності невиходу процесу за встановлені обмеження [14, 21, 29]. Це завдання формулюється таким чином: нехай є відомими значення параметрів α_s ($s = 1, 2, \dots, k$), отримані в моменти часу t_i ($i = 1, 2, \dots, n$), і в кожен момент t_i функція стану $F(\alpha, t_i)$ повністю характеризується функцією розподілу $\psi(F)$. Необхідно за відомими значеннями $\alpha, \alpha_s(t_i), F(\alpha_s, t_i), \Psi_i(F), t_i \in [t_0, \dots, t_n]$ обчислити функцію розподілу

$$\psi_{n+i}(\varepsilon) = P\{|F(\alpha, t_{n+i}) - F_H(\alpha)| < \varepsilon\}, \quad (8.21)$$

де $\varepsilon = F^*(\alpha_s) - F_H(\alpha_s)$;

$F_H(\alpha_s)$ – номінальне значення функції $F(\alpha, t)$;

$F^*(\alpha_s)$ – допустиме значення функції $F(\alpha, t)$ в області t_{n+1}, \dots, t_{n+m} для значень t_{n+j} ($j = 1, 2, \dots, m$).

Детальний виклад імовірнісного прогнозування можна знайти в науково-технічних публікаціях, наприклад в [14, 21].

8.4. Методика розрахунку комплекту запасних елементів для вузлів мехатронних систем

Комплект запасних елементів для вузлів мехатронної системи є необхідним для заміни тих елементів, що відмовили під час експлуатації. Якщо відмова системи відбулася, коли комплект запасних елементів витрачено, виникає вимушений простій, пов'язаний зі збитками. З іншого боку, надмірна кількість запасних елементів призводить до збільшення вартості експлуатації, тобто до невиправданих витрат.

Момент виникнення потреби в тому чи іншому елементі взагалі є випадковим, тому для розрахунку комплекту запасних елементів потрібно знайти ймовірність $P_z(T_e, \Theta)$ того, що система з ймовірністю відновлення $\Theta(t_3)$ за певний час t_3 виконає задані функції протягом часу T_e за умови, що в наявності є z запасних елементів.

Маючи в своєму розпорядженні таку залежність, можна визначити потрібну кількість Z_p запасних (резервних) елементів, що гарантує з імовірністю $P_z = P_z(T_e, \Theta)$ працездатний стан мехатронної системи [22].

Потік відмов елементів вузлів мехатронних систем є близьким до найпростішого і характеризується параметром Λ , величину якого визначають за виразом

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n n_i \lambda_i, \quad (8.22)$$

де n — кількість груп елементів у системі;

n_i — кількість елементів у відповідній групі;

λ_i — інтенсивність відмов елементів i -ї групи.

Зазвичай кількість витрачених з комплекту запасних елементів z за час T_e дорівнює кількості відмов, що виникли в мехатронній системі за той самий час. За зазначених умов імовірність $P_z(T_e)$ того, що за час T_e потрібно z запасних елементів, обчислюється за формулою Пуассона [22]

$$P_z(T_e) = \frac{\Lambda T_e^z}{z!} e^{-\Lambda T_e}, \quad (8.23)$$

де $z = 0, 1, 2, \dots$

Тоді ймовірність, що мехатронна система виконає свої функції протягом часу T_e з урахуванням відновлення за час, не більший від t_3 , за наявності z запасних елементів,

$$P_z(T_3, \theta) = e^{-\Lambda T_3} \sum_{i=0}^z \theta \frac{(\Lambda T_e)^i}{i!}. \quad (8.24)$$

Загальний обсяг необхідного комплекту запасних елементів знаходять без урахування процесу відновлення, тобто вважають, що відновлення за час t_3 завжди має місце. Це випадок, коли значення $\Theta(t_3)$ є достовірним, тобто $\Theta(t_3) = 1$. Тоді вираз для $P_z(T_e, \Theta)$ матиме такий вигляд:

$$P_z(T_e, 1) = P_z = e^{-\Lambda T_3} \sum_{i=0}^n \frac{(\Lambda T_e)^i}{i!}. \quad (8.25)$$

У разі фіксованого значення кількості запасних елементів мехатронної системи $z = z_p$ імовірність $P_z = P_{z_p}$ можна розглядати як показник, що характеризує ступінь упевненості в тому, що мехатронна система виконає свої функції. З іншого боку, задане значення P_{z_p} можна використати для визначення кількості запасних елементів z_p , наявність якої гарантує з достовірністю $P_{z_p} \cdot 100$ % працездатний стан мехатронної системи протягом часового інтервалу T_e .

Середнє значення кількості запасних елементів $Z_{p_{сер}}$, що використовують за час експлуатації T_e , визначається як математичне сподівання значення випадкової величини z :

$$Z_{p_{сер}} = \sum_{z=1}^{\infty} \frac{(\lambda T_e)^z}{z!} e^{-\lambda T_e} = \lambda T_e. \quad (8.26)$$

Через випадковий характер виникнення відмов у вузлах мехатронних систем потрібно запасних елементів або більше, або менше, ніж $Z_{p_{сер}}$. Гарантійне значення ймовірності того, що за час T_e буде витрачено не більше $Z_{p_{сер}}$ запасних елементів, буде близьким до 0,5. Така гарантійна ймовірність зазвичай є недостатньою.

Для визначення кількості запасних елементів z_p , що гарантує працездатний стан мехатронної системи з більш високим значенням імовірності, зручно скористатися залежністю між значеннями P_{z_p} , $Z_{p_{сер}}$ і Z_p . Значення необхідної кількості можна отримати з виразів (8.25) і (8.26) для $P_z(T_e, 1)$ і $Z_{p_{сер}}$:

$$P_{Z_{p_{сер}}}^i = \sum_{i=0}^{z_p} \frac{Z_{p_{сер}}^i}{i!}. \quad (8.27)$$

Це — основне співвідношення для розрахунку значення z_p за заданим значенням P_{z_p} і відомою величиною $Z_{p_{сер}}$. У тому випадку, коли мехатронна система складається з k груп елементів різного типу,

гарантійну ймовірність роботоздатності мехатронної системи P_{z_p} (8.27)

можна обчислити за виразом

$$P_{z_{p_2}} = \prod_{j=1}^k P_j, \quad (8.28)$$

де P_j — ймовірність роботоздатності мехатронної системи завдяки елементам j -ї групи.

Якщо ввести коефіцієнт запасу

$$k_3 = \frac{z_p}{z_{p_{сер}}}, \quad (8.29)$$

то можна переконатися, що для забезпечення підвищеної гарантійної ймовірності виконання системою своїх функцій у комплекті ЗМП слід мати не $z_{p_{сер}}$, а $z_p = k z_{p_{сер}}$ запасних елементів.

Коефіцієнт запасу завжди більше за одиницю і зростає зі збільшенням значення P_{z_p} . Його розраховують з виразу для P_{z_p} . При досить великих значеннях параметра $z_{p_{сер}}$ (понад 15) розрахунок коефіцієнта запасу проводять з використанням наближеної формули

$$P_{z_p} = F\left(\frac{z_p + 0,5 - z_{p_{сер}}}{\sqrt{z_{p_{сер}}}}\right) = F(y), \quad (8.30)$$

де $F(y)$ — табульована функція Лапласа.

Коефіцієнт запасу в цьому випадку визначають за виразом

$$k_3 = \frac{y}{\sqrt{z_{p_{сер}}}} - \frac{0,5}{z_{p_{сер}}} + 1. \quad (8.29)$$

Знаючи гарантійну ймовірність P_{z_p} і обчисливши $z_{p_{сер}}$, можна знайти аргумент y функції $F(y)$, а потім k_3 і z_p . Таким чином, для розрахунку потрібної кількості z_{p_i} запасних елементів i -го типу мають бути відомими інтервал часу T_e , для якого визначається

z_{p_i} , інтенсивність відмов λ_i елементів певного типу і їх кількість n_i у вузлах мехатронної системи, а також гарантійна ймовірність $P_{z_{p_i}}(T_e)$.

Приклад залежності необхідної кількості запасних елементів z_{p_i} від величини $Z_{p_{сєр}}$ при заданому значенні гарантійної ймовірності $P_{z_{p_i}}(T_e)$ показано на графіках (рис. 8.3). Аргументами функцій є $Z_{p_{сєр}}$ і P_{z_p} .

На рис. 8.4 побудовано графік залежності $k_3 = f\left(Z_{p_{сєр}}, P_{z_p}\right)$.

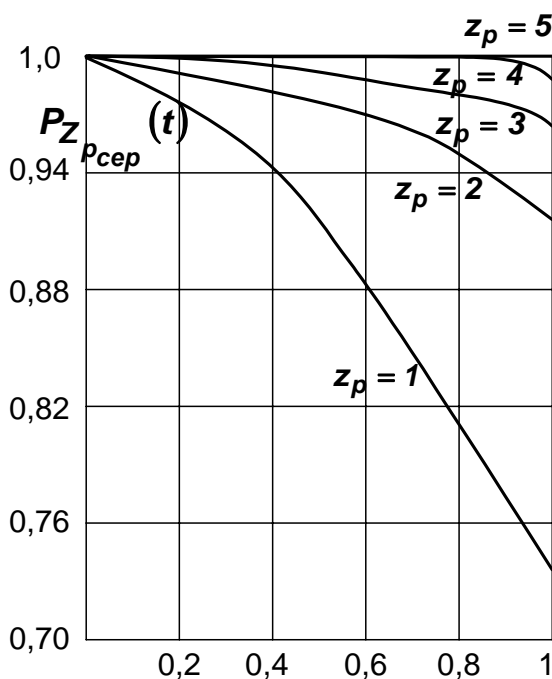


Рис. 8.3. Залежність кількості запасних елементів від $Z_{p_{сєр}}$ при $1 \geq P_{z_p}(t) \geq 0,01$

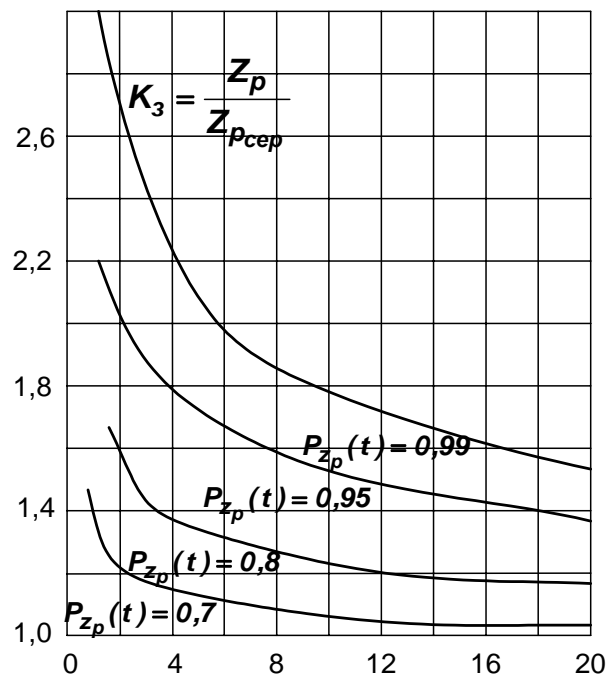


Рис. 8.4. Залежність значення коефіцієнта k_3 від значень $Z_{p_{сєр}}$ і гарантованої ймовірності безвідмовної роботи

З рисунку видно, що обсяг комплекту запасних елементів істотно залежить від гарантійної ймовірності P_{z_p} . Оптимальне значення k_3 встановлюють на основі економічних критеріїв [14, 22, 28]. На практиці значення P_{z_p} вибирають залежно від ступеня відповідальності функцій, що виконують мехатронні системи. Для

мехатронних систем КІВ імовірність P_{z_p} беруть такою, що дорівнює 0,9...0,99 [28].

Створювати запас резервних елементів на весь термін експлуатації мехатронних систем не завжди є доцільним. Застосовуючи викладену методику, можна рекомендувати визначати комплект запасних елементів, який поставляється заводом-виробником і забезпечує відновлення вузлів мехатронної системи протягом гарантійного терміну.

У подальшому експлуатаційні служби можуть прогнозувати потребу в запасних елементах на певний термін (наприклад, на календарний рік) і поповнювати їх запас за встановленим порядком.

Прогресивною тенденцією при створенні мехатронних систем є використання уніфікованих вузлів [29, 30]. Уніфікація — це блочно-модульне будування вузлів.

При визначенні кількості запасних блоків, необхідних для забезпечення роботоздатності системи, слід ураховувати, що вилучені із системи несправні блоки після ремонту через деякий час $t_{рем}$ знову вводять до складу запасних блоків системи. Це дає змогу істотно зменшити потрібну кількість запасних блоків z_p для вузлів МС КІВ.

Середній час ремонту $t_{рем}$, що є характеристикою ремонтпридатності блоку, значно перевищує середній час t_e відновлення мехатронної системи шляхом заміни блоків.

З аналізу статистичних даних випливає, що при належній організації ремонтної служби зі значенням імовірності, близьким до значення достовірності, час ремонту уніфікованих блоків мехатронних систем становить не більше декількох діб ($t_{рем_{макс}} < 100 \text{ год}$) [19, 22, 29].

Якщо час роботи системи між відмовами завдяки блокам певного типу буде більше за значення $t_{рем}$, то для відновлення працездатності мехатронної системи достатньо мати в наявності тільки один запасний блок цього типу ($Z_{p_i} = 1$). Імовірність цієї події, яку можна розглядати як гарантійну ймовірність того, що мехатронна система в усталеному режимі експлуатації не буде простоювати через відсутність справних запасних блоків, якщо в запасі є один блок з часом ремонту $t_{рем_{макс}}$,

$$P_z = e^{-\lambda_i t_{рем_{макс}}}, \quad (8.32)$$

де Λ_i — параметр потоку відмов блоків i -го типу.

Якщо взяти $\Lambda_i = 10^{-5}$ год⁻¹ і $t_{рем\ макс} = 100$ год, то гарантійна ймовірність $P_2 = \exp(-10^{-5} \cdot 100) \approx 0,999$.

Таке значення гарантійної ймовірності є суттєвим для практики експлуатації мехатронних систем. Це дає змогу мати один запасний блок для кількох таких, що працюють в одній мехатронній системі або групі систем. Якщо є n блоків i -го типу, то відповідна гарантійна ймовірність P_{2n_i} визначається за виразом для P_2 .

У цей вираз замість параметра Λ_i підставляють добуток $n\Lambda_i$. Беручи значення гарантійної ймовірності P_{2n_i} таким, що дорівнює 0,99, знайдемо необхідну кількість блоків n_i мехатронної системи [29]:

$$n_i = -\frac{\ln P_{2n_i}}{\Lambda_i t_{рем\ макс}} = -\frac{\ln 0,99}{10^{-5} \cdot 100} \approx 10. \quad (8.33)$$

Це означає, що коли на десять блоків передбачено один запасний і $t_{рем} < 100$ год, то з 99-відсотковою гарантією мехатронна система (або декілька систем) не буде простоювати у разі відмов елементів через відсутність справних блоків. Таку рекомендацію можна взяти для практики при визначенні необхідної кількості запасних блоків з урахуванням їх відновлюваності.

Контрольні запитання

1. Обґрунтуйте суть і принципи технічного обслуговування.
2. Назвіть етапи організації технічного обслуговування.
3. Назвіть часові, імовірнісні й вартісні показники якості технічного обслуговування.
4. Дайте означення коефіцієнта технічного використання.
5. Назвіть складові контролю технічного стану виробу.
6. Дайте означення часу, повноти, глибини й імовірності контролю мехатронних систем (комплексів).
7. Дайте порівняльну характеристику методам діагностичного контролю мехатронних систем.
8. Назвіть суть і складові аналітичного прогнозування стану мехатронних систем.
9. Які чинники впливають на значення імовірності контролю мехатронних систем?

9. РЕМОНТ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

9.1. Ремонт і його види

Ремонт вузлів мехатронних систем — це комплекс заходів і робіт з відновлення справності виробу й ресурсу шляхом заміни або відновлення вузлів МС [21, 26, 27, 29]. У звагальному випадку ремонт вузлів МС поділяють на поточний, середній, капітальний (для використовуваних зразків виробів) і регламентований (для зразків виробів, які перебувають на тривалому зберіганні) [21, 26, 30, 29].

Ремонт складових частин виробу проводять комплексно (одночасно) в обсягах, визначених в експлуатаційній і ремонтній документації.

Під час експлуатації МС з багаторазовим застосуванням неминуче виникають відмови. У міру вироблення ресурсу знижується надійність і погіршується якість роботи вузлів МС, що викликає необхідність проведення ремонту для усунення несправностей або відновлення технічного ресурсу. Система ремонту має відповідати умовам виробничої діяльності й забезпечувати необхідну міру готовності МС до застосування. Ремонт може бути плановим і позаплановим [21, 29].

Плановий ремонт — це ремонт, передбачений у нормативній документації, який здійснюється в плановому порядку. Основою для планування термінів ремонту є ресурс або термін експлуатації і міжремонтні ресурси або міжремонтні терміни експлуатації.

Позаплановий ремонт — вид ремонту, виконання якого обумовлено в нормативній документації, але проводять його поза планом. Необхідність проведення позапланових ремонтів обумовлена виникненням раптових відмов, подіями, що є випадковими (непрогнозованими). Крім того, до позапланового ремонту приводять аварії, втрата працездатності МС у зв'язку зі стихійними лихами й іншими непередбаченими обставинами.

Залежно від завдань ремонту, обсягу ремонтних робіт і технології їх проведення розрізняють три види ремонту: поточний, середній і капітальний [21, 25, 26, 29].

Поточний ремонт — позаплановий ремонт, що здійснюється під час експлуатації для гарантованого забезпечення працездатності МС і полягає в заміні й відновленні її окремих частин і їх регулюванні. Суть поточного ремонту полягає у відновленні елемента, вузла або приладу, що відмовив, його заміні або ремонті з подальшою перевіркою роботоздатності відремонтованого пристрою і МС у цілому. Елементи, що відмовили, замінюють справними з комплекту запасного майна й приладдя (ЗМП). При поточному ремонті використовуються штатні контрольні-вимірвальна прилади й інструменти. Поточний ремонт зазвичай проводить обслуговий персонал (хоча в окремих випадках можуть

залучатися фахівці ремонтних органів) на місці експлуатації і тому є виробничим ремонтом.

Середній і капітальний ремонти — планові. Основним їх завданням є усунення всіх несправностей і відновлення ресурсу вузлів МС, що підлягають ремонту, з тим щоб забезпечити необхідний рівень їх надійності й готовності до чергового планового ремонту. Для вирішення цього завдання під час планових ремонтів не лише усуваються несправності, але й вживаються заходи для запобігання виникненню потенційно можливих відмов у подальший міжремонтний період. З цією метою проводять заміну або ремонт відповідно до розробленої технології зношених елементів і деталей і таких, що виробили термін служби або ресурс, зведення усіх тактико-технічних і експлуатаційно-технічних характеристик і параметрів до вимог, наведених в експлуатаційній і ремонтній документації.

Необхідність чергування двох видів планового ремонту обумовлена тим, що комплектувальні елементи й деталі не є рівнонадійними. Один із можливих варіантів чергування планових ремонтів порівняно простих засобів МС показано на рис. 9.1.

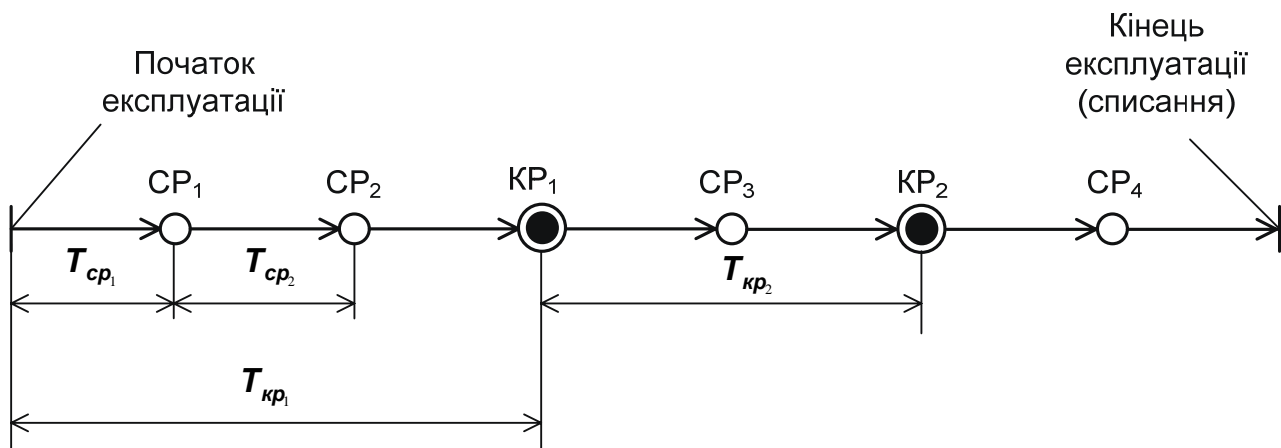


Рис. 9.1. Варіант чергування планових ремонтів: CP — середній ремонт; KP — капітальний ремонт; T_{cp_1} і T_{cp_2} — ресурси до середнього і між середніми ремонтами відповідно; T_{kp_1} і T_{kp_2} — ресурси до капітального ремонту і між капітальними ремонтами

Середній ремонт полягає в ретельній перевірці технічного стану всіх складових частин МС, усуненні виявлених несправностей, заміні зношених елементів, деталей і вузлів, що виробили свій ресурс або термін експлуатації. Ремонт завершується комплексною перевіркою МС зі зведенням до обумовлених в експлуатаційній документації норм усіх експлуатаційно-технічних характеристик і параметрів.

При середньому ремонті можна проводити капітальний ремонт окремих основних складових частин мехатронної системи. Середній ремонт виконують переважно на місці розташування апаратури силами й

засобами ремонтних органів. В окремих випадках середній ремонт може виконуватися на спеціалізованих ремонтних підприємствах.

Капітальний ремонт здійснюється для відновлення справності й повного (або близького до повного) відновлення ресурсу МС із заміною або відновленням будь-яких її частин, включаючи базові, і їх регулюванням. При капітальному ремонті апаратура повністю розбирається, перевіряється й проводиться дефектація усіх без виключення елементів, ремонт елементів, деталей і вузлів, заміна елементів, що виробили свій ресурс, складання, монтаж і налагодження вузлів, її комплексні випробування за спеціальними програмами.

Після капітального ремонту всі характеристики вузлів МС мають відповідати нормам і вимогам, установленим у нормативно-технічній документації.

При капітальному ремонті можна здійснювати часткову модернізацію МС. Капітальний ремонт виконують в основному на ремонтних підприємствах. В особливих випадках, коли демонтаж засобів МС є неможливим або недоцільним, ремонт можна виконувати і за місцем експлуатації МС. Унаслідок капітального ремонту відновлюють усі показники МС, що є характерними для серійних зразків основного виробництва. Однак слід зважати на те, що капітальний ремонт пов'язаний з великими економічними витратами і тому його проведення є доцільним тоді, коли вартість ремонту буде меншою від вартості виготовлення нового зразка.

Значення системи планових ремонтів полягає в забезпеченні високої надійності засобів МС і в плановому початку вирішення завдань з організації ремонту. Відомості про системи ремонту вузлів МС наведено в табл. 9.1.

Таблиця 9.1

Вид ремонту	Призначення ремонту	Періодичність проведення	Хто проводить	Матеріально-технічне забезпечення
Поточний ремонт (ПР)	Забезпечення або відновлення робоздатності виробу шляхом заміни або відновлення окремих вузлів	У випадку отримання ушкоджень або виникненні несправностей, для відновлення яких потрібен поточний ремонт	Підрозділи ТО і ремонту із залученням обслуговуваного персоналу	ЗМП і матеріали, устаткування підрозділів ТО і ремонту

Закінчення таблиці 9.1

Вид ремонту	Призначення ремонту	Періодичність проведення	Хто проводить	Матеріально-технічне забезпечення
Середній ремонт (СР)	Відновлення справності й часткове відновлення ресурсу виробу із заміненням або відновленням складових обмеженої номенклатури	Після закінчення ресурсу до середнього ремонту	Ремонтно-відновні бази, й підрозділи	ЗМП і матеріали відповідно до норм витрат на СР
Капітальний ремонт (КР)	Відновлення справності й повного (близького до повного) ресурсу зразка виробу із заміненням або відновленням будь-яких частин, у тому числі базових, часткове відновлення ресурсу зразка виробу із заміненням або відновленням складників обмеженої номенклатури	Після закінчення ресурсу до капітального ремонту	Стаціонарні ремонтні підрозділи	ЗМП і матеріали згідно з нормами витрат на КР. Устаткування ремонтних підприємств
Регламентований ремонт (РР)	Повне (близьке до повного) відновлення ресурсу і надійності виробу, що зберігається тривалий час	Після закінчення терміну зберігання, визначеного в керівних документах	Стаціонарні ремонтні підприємства	ЗМП і матеріали згідно з нормами витрат на РР. Устаткування ремонтних підприємств

Для підвищення рівня організації ремонту складається план. Початковими даними для складання планів середнього й капітального ремонтів є результати технічних оглядів, статистичні експлуатаційні дані про характеристики вузлів МС, спостереження обслугового персоналу, а також розраховані міжремонтні ресурси й терміни експлуатації [29].

Перед ремонтом проводять комплекс основних підготовчих робіт [21, 29]: складання відомості дефектів і плану організації робіт, визначення обсягу ремонтних робіт, складання й затвердження кошторисів, забезпечення фінансування робіт та ін.

До ремонту вузли МС передають за актами, у яких наводять дані про їхній технічний стан і комплектність. До актів додають паспорт і, у разі аварії, аварійний акт.

Мехатронні системи з дефектами, усунення яких не передбачено в нормативній документації, а також з такими, що виникли внаслідок аварії

або порушення правил експлуатації, приймаються тільки за угодою з ремонтними підприємствами.

Вузли МС очищують від бруду, корозії, упаковують, щоб захистити від механічних та інших ушкоджень при транспортуванні, укомплектовують складальними одиницями, передбаченими в конструкторській документації. Після закінчення ремонту всі роботи за актом приймає комісія, яку призначає керівник експлуатаційної або ремонтної організації.

До відремонтованих вузлів МС додають: паспорт підприємства-виробника з відміткою про виконання ремонту, акт про видачу вузла МС з ремонту, акт випробовувань, документ про консервацію і пакування. Допускається замість відміток у документах робити їх у паспорті на вузли МС. Ремонтні підприємства повинні випускати вузли МС з ремонту справними й гарантувати їх працездатність упродовж певного терміну.

9.2. Показники якості ремонту

Якість ремонту оцінюється часовими й імовірнісними показниками, наведеними в розд. 3, а також показниками, що характеризують його трудомісткість і вартість [21, 26]. Трудомісткість ремонту визначається трудовитратами на проведення одного ремонту вузла МС і вимірюється в людино-годинах.

Сумарні трудовитрати на проведення ремонтів виробу за певний період експлуатації становлять сумарну трудомісткість ремонтів. Трудовитрати на ремонт залежать від багатьох випадкових чинників, таких, як кваліфікація спеціалістів, прийнята система й технологія ремонту, система матеріально-технічного забезпечення та ін. Це приводить до того, що й сама величина, яка є вираженням трудомісткості, стає випадковою. Тому найбільш повними характеристиками якості ремонту є його середня сумарна й питома сумарна трудомісткості

Середня сумарна трудомісткість ремонтів $\theta_{\Sigma \text{сеп}}$ являє собою математичне сподівання сумарних трудовитрат θ_{Σ} на всі види ремонтів об'єкта за певний період експлуатації:

$$\theta_{\Sigma \text{сеп}} = M[\theta_{\Sigma}] = \int_0^{\infty} \theta_{\Sigma} f(\theta_{\Sigma}) d\theta_{\Sigma}, \quad (9.1)$$

де $f(\theta_{\Sigma})$ — щільність імовірності сумарних трудовитрат.

Питома сумарна трудомісткість ремонтів γ_{θ} визначається як відношення середньої сумарної трудомісткості ремонтів до математичного сподівання сумарного наробітку об'єкта за один і той самий період експлуатації.

Економічна сторона процесу ремонту МС може характеризуватися вартістю ремонту при усуненні чергової несправності або сумарною вартістю проведення усіх видів ремонтів МС за певний період експлуатації.

Вартість ремонту, як і трудомісткість, залежить від багатьох чинників і, зокрема, таких, як характер несправності, кваліфікація і кількість фахівців, які беруть участь у ремонті, складу ЗМП та ін. До цієї вартості включають також амортизаційну вартість контрольно-виміральної апаратури, інструменту, витраченої електроенергії і т. ін.

Середня сумарна вартість визначається як математичне сподівання сумарних витрат на всі види ремонту за певний період експлуатації:

$$C_{\Sigma \text{сер}} = M[C_{\Sigma}].$$

Питома сумарна вартість ремонтів — це відношення середньої сумарної вартості ремонтів до математичного сподівання сумарного наробітку об'єкта за один і той самий період експлуатації.

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть ремонту? Які існують види ремонтів?
2. Наведіть характеристику єдиної системи ремонту виробів.
3. У яких випадках проводять регламентований ремонт?
4. Наведіть перелік заходів з підготовки виробу до ремонту.
5. Якими чинниками визначається трудомісткість ремонту?
6. Які складові утворюють середню сумарну вартість ремонту?
7. Наведіть варіанти чергування планових ремонтів.
8. Коли проводять поточний ремонт виробів?
9. Коли проводять середній ремонт виробів?

10. ЗБЕРІГАННЯ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

10.1. Зберігання і його види

Мехатронні системи, які не використовують за прямим призначенням, підлягають зберіганню. Від терміну зберігання значною мірою залежить організація й умови зберігання, місце зберігання тощо [21, 29]. Тривалому зберіганню підлягають МС одноразового застосування, а також елементи й системи, що належать до складу ЗМП або є ненавантаженим резервом, а короткочасному — МС багаторазового застосування, більшість з яких на виробництві використовують за призначенням дуже рідко.

Для тривалого зберігання вузлів МС існують спеціально обладнані складські приміщення. Перед зберіганням вузли консервують.

Короткочасне зберігання організують зазвичай на місці розміщення МС у виробничих приміщеннях. Під час зберігання вузлів МС у комплектувальних елементах апаратури відбуваються природні фізико-хімічні процеси, що спричиняють їх старіння [21]. Крім того, на засоби МС впливають різні чинники зовнішнього середовища, прискорюючи процес старіння елементів. Усе це змінює властивості, а отже, і параметри комплектувальних елементів, що зрештою призводить до змінення технічних і експлуатаційних характеристик засобів МС.

При значному змінненні параметрів елементів ці характеристики можуть перевищити межі експлуатаційних допусків і призвести до часткової або повної відмови вузлів МС. Тому головним завданням, що вирішується при зберіганні, є підтримка основних технічних і експлуатаційних характеристик у межах допусків, зазначених в експлуатаційній документації. Виконання цього завдання істотно залежить від організації зберігання, а також від того, у якому стані вузли МС було передано на зберігання.

Вузли, призначені для зберігання, мають бути справними (окрім тих, що підлягають ремонту) і повністю укомплектованими. Уся експлуатаційна документація має бути відповідним чином оформленою. Засоби МС повинні зберігатися комплектно, за виключенням випадків, коли частина комплекту потребує інших умов зберігання.

Якщо передбачається тривале зберігання (більше одного року), то засоби МС має бути заздалегідь законсервовано. Перед консервацією необхідно зробити ретельний огляд засобів, очищення, видалення слідів корозії і плісняви. Перед консервацією відновлюють лакофарбові покриття, змащують з'єднання, що труться, і перевіряють роботоздатність апаратури. При виявленні несправностей засоби ремонтують.

Консервація є радикальною мірою захисту від шкідливих дій зовнішнього середовища. Її зазвичай уживають у тих випадках, коли необхідно зберігати вузли МС не в спеціально обладнаних приміщеннях, а в польових умовах, на відкритих майданчиках або у сховищах, де умови зберігання не відповідають оптимальним [29].

Основними способами консервації є нанесення захисних покриттів і герметизація. Захисні покриття перешкоджають шкідливій дії вологи на металеві вироби або окремі вузли й деталі. Як захисні покриття використовують консистентні й рідкі мастила, інгібітори й органічні плівки.

Консистентні мастила застосовують для зовнішнього покриття виробів з кольорових і чорних металів при зберіганні їх на відкритих майданчиках. Ці мастила забезпечують захист металів від корозії впродовж декількох років. Сьогодні найбільшого поширення набувають рідкі мастила з інгібіторами — хімічними речовинами, які, адсорбуючись на поверхню металу, надійно захищають його від корозії [21]. При цьому для консервації виробів, що зберігаються на відкритих майданчиках, необхідно використовувати мастила з підвищеною вологостійкістю.

Інгібіторами корозії є речовини, які при введенні в середовище, що сприяє активному розвитку корозійних процесів, уповільнюють руйнування металевих конструкцій. Їх вводять до складу мастил і пакувальних паперів. При зберіганні засобів МС у герметизованій посудині зазвичай застосовують легкі інгібітори. Їхня захисна дія виявляється в основному на невеликій відстані від носія інгібітора (0,2—0,5 м). Такими носіями зазвичай є папір або картон, змочений розчином інгібітора, який розміщують у щілинах, отворах та інших вільних місцях вузлів МС.

Органічні плівкові покриття отримують шляхом нанесення на вироби хлорвінілової емалі з десятьма відсотками маршаліту (меленого піску). Така плівка має високі антикорозійні властивості: є термо- і морозостійкою, не спалахує при коротких замиканнях, не розчиняється в бензині, гасі, робочих оліях, є стійкою до неорганічних кислот, легко знімається із законсервованих виробів і водночас не відшаровується при дії вібраційних навантажень. Плівку наносять або розпилювачем, або шляхом занурення вузлів МС у ванну.

Консервація способом герметизації — це ізоляція вузлів МС від дії зовнішнього середовища в герметичних упаковках, у яких з допомогою вологопоглинача підтримується низька вологість повітря. Для герметизації засобів МС залежно від їх типу можна використовувати методи зачохлення або заклеювання. Перший метод застосовують для консервації переносної апаратури й такої, що знаходиться в пакувальній тарі (в укладальних ящиках), другий — для консервації апаратури, яка розміщують у кузовах причепів або спеціальних транспортних засобів.

Герметизувальні чохли виготовляють з органічної плівки, що має малу паропроникність (поліетиленові й поліхлорвінілові плівки). У чохлі розміщують вологопоглинач, частіше — силікагель. Граничним значенням відносної вологості в чохлі вважається значення близько 55 %. При введенні разом з силікагелем легких інгібіторів відносну вологість усередині чохла можна підвищити до 75—80 %, що дає змогу або значно збільшити терміни зберігання зачохленої апаратури за тією ж нормою закладки силікагелю, або зменшити норму закладки силікагелю в два-три рази.

Метод заклеювання застосовують для консервації мобільних МС, які розташовують на транспортних засобах. Суть герметизації полягає в заклеюванні й замазуванні усіх отворів, щілин, люків, вікон, дверей тощо вологонепроникними матеріалами. Для осушення повітря всередину чохла, що герметизується, поміщають силікагель.

З досвіду експлуатації МС КІВ впливає, що найбільш сприятливими умовами зберігання, які забезпечують найменшу інтенсивність відмов, є такі [21, 25, 26, 29]:

- постійна температура повітря, близько 0 °С (2...5 °С);
- низька відносна вологість повітря в межах 10...30 %;

- відсутність у повітрі шкідливих домішок у вигляді пилу, пари солей, кислот, лугів, хлоридів, сірки і з'єднань на її основі;
- відсутність циркуляції повітря;
- відсутність прямих сонячних променів;
- достатня захищеність апаратно-програмних засобів МС від дії електромагнітного й радіаційного проміння;
- відсутність комах і гризунів.

Такі умови зберігання можна забезпечити тільки в спеціально обладнаних приміщеннях, що мають систему кондиціонування повітря. Проте на практиці зазвичай обмежуються вимогами, щоб при зберіганні температура в приміщенні була в межах 10...20 °С і відносна вологість повітря не перевищувала 60–65 % за умови відсутності в ньому шкідливих домішок.

Для контролю за температурою і вологістю приміщення, де зберігаються засоби МС, має бути обладнано термометрами й психрометрами.

Разом з переліченими умовами для підтримання МС у справному (роботоздатному) технічному стані на етапі зберігання мають провадитися такі заходи:

- контроль умов зберігання (температури й вологості);
- контроль технічного стану апаратури;
- технічні огляди;
- технічне обслуговування й ремонт;
- поповнення складу необхідною кількістю нових зразків засобів МС замість витрачених або таких, що не підлягають відновленню;
- контроль консервації;
- розконсервація і переконсервація після закінчення термінів консервації.

Метою контролю умов зберігання засобів МС є перевірка їх відповідності заданим умовам, і в основному систематичне спостереження за температурою і вологістю повітря в сховищах. Значення цих параметрів безперервно реєструються термографами й гідрографами.

Контроль технічного стану проводять з метою перевірки відповідності кількісних значень параметрів, що характеризують роботоздатність засобів МС, вимогам нормативно-технічної документації. Якщо на зберіганні є невелика кількість зразків апаратури, то всі вони підлягають контролю. При зберіганні великої партії виробів зазвичай здійснюють вибірковий контроль їхнього стану. Обсяг вибірки визначають за правилами математичної статистики [19, 26]. Якщо результати вибіркового контролю є незадовільними, то здійснюють контроль усієї партії, що зберігається.

Збільшення періоду контролю приводить до зниження ймовірності безвідмовного зберігання засобів на заданий момент часу.

10.2. Показники якості зберігання

При переведенні МС у режим зберігання можна визначити інтервал часу між черговими перевірками, якщо заданою величиною є ймовірність безвідмовного зберігання. Під час перевірки здійснюється повний контроль роботоздатності МС, тобто контролюються всі пристрої, що входять до складу МС. Тоді ймовірність безвідмовного зберігання до кінця інтервалу (t_{s-1}, t_s) між $(s - 1)$ -ю і s -ю перевірками визначається співвідношенням

$$P(t_s - t_{s-1}) = \exp \left[- \int_{t_{s-1}}^{t_s} \lambda_{36}(\tau) d\tau \right], \quad (10.1)$$

де $(t_s - t_{s-1})$ — період контролю T_K ;

λ_{36} — інтенсивність відмов системи при зберіганні.

Для забезпечення заданого рівня безвідмовності при зберіганні має виконуватись умова

$$(P(t_s - t_{s-1}) = P(T_K)) > P_{36}. \quad (10.2)$$

Очевидно, що для кращої економії доцільно вибрати такий період контролю, який дає змогу забезпечити існування рівності у попередньому виразі, тобто

$$\exp \left[- \int_{t_{s-1}}^{t_s} \lambda_{36}(\tau) d\tau \right] = P_{36}. \quad (10.3)$$

Прологарифмувавши ліву й праву частини рівності, отримаємо

$$\int_{t_{s-1}}^{t_s} \lambda_{36}(\tau) d\tau = - \ln P_{36}. \quad (10.4)$$

У разі існування експоненційного розподілу часу між відмовами $\lambda_{36}(t) = \lambda_{36} = \text{const}$. З виразу (10.4) отримаємо

$$\lambda_{36}(t_s - t_{s-1}) = \lambda_{36} T_K = - \ln P_{36}.$$

Звідси

$$T_K = -\lambda_{36}^{-1} P_1 \ln P_{36}.$$

Розрахувавши значення T_K , необхідно порівняти його із заданим терміном зберігання $t_{зб}$. Якщо $T_K > t_{зб}$, то проведення перевірок є недоцільним, оскільки це лише збільшує вартість зберігання. Окрім того, при кожній перевірці певна частина засобів виходить з ладу унаслідок як перехідних процесів при ввімкненні, так і помилок обслуговування персоналу.

Якщо $T_K < t_{зб}$, то доцільно проводити контроль технічного стану вузлів МС, що зберігаються.

Технічне обслуговування при зберіганні здійснюється зазвичай за календарним принципом [14, 15] і містить щоденні технічні огляди, щотижневе, щомісячне й сезонне (весняно-літнє й осінньо-зимове) ТО. Обсяг робіт при ТО визначається з експлуатаційної документації.

Якщо засоби зберігають під наметами й на відкритих майданчиках, то при ТО також перевіряють якість консервації і приймають заходи з усунення виявлених недоліків.

Необхідно зазначити, що реальна періодичність усіх заходів, їхній конкретний зміст можуть істотно змінюватися залежно від умов зберігання. При проведенні ТО під час зберігання, прийняття в експлуатацію вузли МС переконсервовують у тих випадках, коли збігли терміни консервації, установлені в експлуатаційній документації, має місце порушення захисних покриттів (висихання, розтріскування, старіння, забруднення й т. ін.), на поверхнях деталей виникла корозія.

Для забезпечення якісного зберігання сховища повинні мати устаткування для розміщення вузлів МС, засоби контролю умов зберігання, захисту від біологічних шкідників, пожежогасіння, інвентар для прибирання сховищ, документацію (план розміщення засобів у сховищі, графіки проведення ТО і контролю технічного стану, інструкцію з правил і заходів безпеки при проведенні робіт у сховищі й на вузлах МС, правила пожежної безпеки, інструкцію із захисту від біологічних шкідників і плани розміщення засобів боротьби з ними, журнал обліку температури, вологості повітря в сховищі та ін.).

Контрольні запитання

1. Обґрунтуйте суть і види зберігання вузлів мехатронних систем.
2. Дайте характеристику короткотермінового й довготермінового зберігання засобів мехатронних систем.
3. Назвіть способи консервування виробів.
4. Обґрунтуйте склад показників якості зберігання засобів мехатронних систем.
5. Які види технічного обслуговування проводяться при зберіганні засобів мехатронних систем?
6. Наведіть вираз для ймовірності безвідмовної роботи при зберіганні.

7. Яким чином обчислюють значення періоду контролю засобів при зберіганні мехатронних систем?

8. Яким чином здійснюють контроль температури й вологості в місцях зберігання?

9. Наведіть найбільш сприятливі умови зберігання засобів мехатронних систем.

11. ШЛЯХИ ОТРИМАННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ТЕХНІЧНИЙ СТАН МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

11.1. Вимоги до статистичних даних про надійність мехатронних систем

Оцінювання надійності складних систем, до яких належать і мехатронні системи, за статистичними даними є одним із найбільш актуальних завдань теорії надійності на сучасному етапі [21, 26, 29]. У зв'язку з доданням кількісних показників надійності до технічних вимог на засоби й вузли МС виникає необхідність не тільки теоретичної, але й дослідної перевірки здійсненності цих вимог на етапі експлуатації [21].

Вирішення цього завдання потребує розроблення певних математичних методів, а також проведення організаційних заходів зі збору статистичних даних під час експлуатації, планування й проведення випробувань. Від якості цих даних значною мірою залежить можливість виконання завдань контролю технічного стану МС. Якість статистичної інформації залежить від достовірності, повноти, безперервності й оперативності [14].

Достовірність досягається шляхом точного урахування всіх відмов незалежно від причини виникнення, наслідків або трудомісткості їх усунення. Не менш важливим є також правильне визначення причин відмов. Наприклад, іноді відмови системи, що виникли через несправність датчика, відносять як до об'єкта керування, так і до пристрою керування. Тому під час експлуатації вузлів МС необхідно ретельно виявити причини виникнення відмов. Достовірність інформації значною мірою залежить від кваліфікації обслугового персоналу, який збирає відомості про відмови, що виникли.

Повнота інформації полягає в тому, що зібрані відомості мають бути

достатніми для вирішення поставлених завдань. Повнота інформації, як і достовірність, суттєво залежить від кваліфікації обслугового персоналу.

Оперативність отримання інформації необхідна для своєчасного впливу на процес виготовлення вузлів МС з метою якнайшвидшого усунення виявлених недоліків. Чим швидше буде їх виявлено, тим вищим буде економічний ефект під час виготовлення й експлуатації мехатронних систем. Особливо важливою є інформація про надійність дослідних унікальних зразків вузлів МС.

У деяких випадках потрібна й безперервність інформації. Через перериви в отриманні інформації утруднюється оброблення й втрачається її частина, особливо в тих випадках, коли потрібно визначити закони розподілу відмов.

Обсяг інформації, що збирається, визначається цілями дослідження, особливостями МС та умовами її експлуатації. Розглянемо необхідні дані для розв'язання типових завдань оцінки технічного стану вузлів МС. Для визначення кількісних показників безвідмовності й виявлення найменш надійних елементів необхідними є такі відомості:

- найменування і тип вузла, пристрою, елемента МС, які відмовили;
- час настання відмови;
- наробок МС (моменти ввімкнення і вимкнення під час експлуатації (використання за призначенням));
- причина виникнення відмови.

Слід ураховувати, чи сталася відмова за умов, будь-якою мірою відмінних від тих, у яких вузли МС перебувають більшу частину часу (наприклад, при ввімкненні чи змінненні режиму роботи, стрімкому підвищенні температури тощо).

При дослідженні впливу умов експлуатації на безвідмовність засобів необхідні додаткові відомості про умови роботи МС (значення температури зовнішнього середовища, відносної вологості, частоти й амплітуди вібрації, запиленості, наявності агресивних домішок у зовнішньому середовищі тощо) і про режим роботи (середню кількість увімкнень за годину для виконавчих механізмів, параметрів настроювання для регульовальчих блоків, величин напруг і струмів живлення тощо) із зазначенням зміни умов і режиму роботи в часі.

Для визначення кількісних показників ремонтпридатності крім відомостей про відмови вузлів МС необхідні відомості про час відновлення на місці застосування вузла за призначенням, час відновлення в майстернях, час простою. Для вирішення завдань, пов'язаних з ремонтпридатністю,

іноді необхідними є більш диференційоване визначення часу відновлення вузлів МС на місці застосування за призначенням і часу простою (визначення тривалості пошуку причини відмови, часу усунення відмови, часу ввімкнення МС в роботу, часу очікування заміни вузла, що відмовив).

Для визначення кількості необхідних запасних елементів окрім показників безвідмовності й ремонтпридатності потрібно мати відомості про способи відновлення справного стану: відновлення було здійснено на місці чи в майстерні, із заміненням чи без замінення елемента (пристрою), що відмовив; якщо було замінено не пристрій у цілому, а окремі його елементи, то необхідно вказати, які елементи було замінено.

При обслуговуванні засобів МС необхідними є дані про те, який саме персонал усунув відмову, обслуговий чи спеціальний ремонтний, а також про кваліфікацію осіб, які проводили відновлення. Залежно від цілей дослідження можливим є також збирання іншої інформації.

Для вирішення розглянутих вище завдань особливе значення має збір даних про відмови. Дані про характеристики надійності вузлів МС можна отримати або під час випробувань на підприємстві-виготовлювачі, або в науково-дослідній установі (випробування на надійність, періодичні, спеціальні як всієї МС, так і складових вузлів), або на основі досвіду експлуатації [21].

Дані, отримані під час експлуатації, є найбільш цінними, оскільки відображають усю різноманітність факторів, що впливають на надійність вузлів МС у реальних умовах їх застосування.

З метою дослідження експлуатаційної надійності МС застосовують дві основні системи збору інформації [21, 29]: *оперативна*, коли в організацію, що збирає інформацію, надходять окремо відомості про кожну відмову, і *регулярна*, коли відомості надходять у певні терміни (наприклад, щоквартально або щорічно).

Оперативну інформацію збирають з допомогою разових документів [21]. Застосування таких документів спрощує автоматизацію процесу оброблення відомостей про надійність МС. Недоліком оперативної системи збору інформації є те, що її застосовують і до справних МС.

При регулярній системі збору інформації відомості про відмови фіксують в журналах відмов або в паспортах (відомостях) [29].

Існує багато шляхів отримання необхідної інформації про відмови вузлів МС, але майже всі вони зводяться до двох [21]:

— заповнення різноманітних форм, анкет, карток, паспортів, журналів тощо;

— проведення підконтрольної експлуатації окремих вузлів МС.

Зазвичай розробляються спеціальні документи, до яких необхідно заносити основні відомості, що характеризують надійність вузлів МС під час її роботи в конкретних умовах випробувань або експлуатації. Різноманітні форми використовуються для повідомлення про відмови і наробок МС при експлуатації. Одним із основних способів отримання даних про технічні характеристики МС є оброблення інформації про відмови, умови і причини їх виникнення. Сьогодні найбільш поширеним є метод збору даних, що потребує найменших витрат. Суть його полягає в складанні звітів обслуговим персоналом про функціонування засобів МС. Основним недоліком цього методу є мала точність, оскільки обслуговому персоналу складно робити неупереджені висновки, а головні проблеми не завжди є для нього очевидними.

Під час збирання інформації для перевірки достовірності доцільною є організація контрольних записів про відмови, що здійснює не обслуговий, а спеціально призначений персонал, який тільки фіксує відмови. Іноді дані про відмови одержують з допомогою інтерв'ювання обслугового персоналу, яке проводять або шляхом бесід, або з допомогою анкет. Цей метод застосовують рідко через значні витрати. Незначного поширення набув вибірковий метод збору, коли спостереження за роботою засобів МС здійснюються у вибіркові моменти часу, а не безперервно [21].

Таким чином, зібрана статистична інформація має забезпечити вирішення таких завдань:

— визначення кількісних показників надійності й готовності комплексувальних елементів, необхідних при плануванні робіт з технічного обслуговування, і МС у цілому, отримання операторами МС даних про поточні значення характеристик для підтримки впевненості в надійності й готовності МС;

— виявлення найбільш ненадійних вузлів і причин їх відмов з метою розроблення й впровадження організаційних, конструктивних і технологічних заходів, спрямованих на усунення наявних недоліків;

— уточнення експлуатаційної і ремонтної документації;

— дослідження впливу умов навколишнього середовища на надійність і готовність вузлів МС;

— визначення або уточнення номенклатури й обсягу запасного майна і приладів;

— розроблення й удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту.

11.2. Організація збору і послідовність оброблення статистичних даних

Система збору й оброблення інформації (СЗОІ) про надійність вузлів МС має забезпечувати [15, 19, 21]:

- отримання порівнянних і об'єктивних даних про надійність і готовність однотипних МС;
- можливість узагальнення в експлуатаційних організаціях результатів оброблення інформації про надійність однотипних МС;
- можливість організації централізованого оброблення інформації про надійність деталей, вузлів і комплектувальних елементів, що належать до різних за функціональним призначенням вузлів МС;
- установа ефективного зворотного зв'язку між розробниками, виробниками й споживачами МС.

Збір і оброблення інформації про надійність і готовність МС мають проводитися для отримання достовірних даних, що дають змогу розробляти й проводити:

- розробниками — конструктивні вдосконалення вузлів МС з метою підвищення рівня їх надійності;
- виготовлювачами — удосконалення технології виготовлення, складання, контролю й випробувань, спрямованих на забезпечення й підвищення рівня надійності вузлів МС;
- ремонтними підприємствами — організаційно-технічні заходи, які спрямовано на підвищення якості ремонту й зменшення витрат на їх проведення;
- експлуатувальниками — організаційно-технічні заходи, спрямовані на дотримання правил експлуатації і підщення ефективності застосування за призначенням і проведення усіх видів ТО.

Збір і оброблення інформації про надійність і готовність МС мають забезпечити:

- визначення причин виникнення відмов і несправностей;
- виявлення деталей, складальних одиниць і комплектувальних виробів, що обмежують рівень надійності МС;
- установа й коригування нормованих показників надійності МС і їх елементів;
- оптимізацію норм витрат запасних частин і систем планово-попереджувальних ремонтів;

— виявлення впливу умов і режимів експлуатації на надійність і готовність МС;

— визначення економічної ефективності від заходів щодо підвищення рівня надійності МС.

Систему збору й оброблення інформації про надійність МС застосовують організації з розроблення й виготовлення засобів МС, а також ремонтні й експлуатаційні організації [21, 29].

Організації й підрозділи, які збирають і оброблюють інформацію про рівень надійності мехатронних систем мають здійснювати:

— розроблення технічного завдання щодо збору інформації про стан надійності конкретного типу МС, вибору і розміщення об'єктів спостережень;

— розроблення плану проведення спостережень;

— розроблення програми аналізування інформації про надійність МС з урахуванням планованого обсягу робіт;

— вибір опорних пунктів і підрозділів-споживачів для проведення спостережень;

— узгодження з експлуатаційними організаціями, вибраними для спостереження МС, програм і методик проведення робіт;

— розроблення інструкцій із заповнення форм для збору інформації;

— розроблення рекомендацій з удосконалення конструкції, технології і режимів експлуатації з метою підвищення рівня надійності МС.

Існують різні форми обліку й подання статистичних даних про експлуатацію засобів МС [21]. У цих формах у стилізованій формі наводяться дані про тип відмови, дату і час виявлення несправності, тривалість роботи вузла МС з моменту ввімкнення до виникнення відмови.

З аналізу закону розподілу часових інтервалів між відмовами можна зробити висновок про вплив перехідних процесів на безвідмовність системи й розробити відповідні рекомендації та організаційно-технічні заходи.

Доцільно також указати режим (наприклад, автономні перевірки, комплексні перевірки тощо) і вид роботи (застосування за призначенням, ремонт, профілактика тощо) вузлів МС, наробок апаратури з початку експлуатації до моменту виявлення відмови. Ці дані використовують для оцінювання значень T_0 , $P(t)$ та інших показників.

Значення часу наробку елементів на відмову використовують для розрахунку інтенсивності відмов елементів. Значення інтенсивностей характеризують правильність конструктивного рішення пристрою.

Роблять також висновок про причини виникнення відмов і наслідки цих відмов (наприклад, невиконання роботи в якомусь режимі, погіршення точності вимірювань, непроходження інформації тощо).

На основі цієї інформації розробляють пропозиції щодо поліпшення характеристик відновлення, ремонтпридатності, зручності експлуатації МС тощо.

Під час збору й обліку інформації необхідно визначити:

- середні значення (оцінки) сумарної й оперативної тривалості, трудомісткості й вартості операцій ТО;

- середні значення сумарної й оперативної тривалості, трудомісткості й вартості операцій ремонтів;

- фактичні витрати запасних частин і матеріалів на проведення ТО і ремонту вузлів МС;

- фактичні витрати мастильних і допоміжних матеріалів;

- інформацію для обґрунтування рекомендацій з питань оптимізації систем планово-попереджувальних ТО і ремонтів.

Як джерела інформації використовують зазвичай дані технологічних документів, звітних документів підрозділів, що здійснюють ТО і ремонт вузлів МС (наприклад, карти-накопичувачі відомостей про ТО і ремонти МС за розрахунковий період [21]). Ці джерела мають відображати такі дані: найменування, марка, тип вузла МС; найменування підприємства-виробника; заводські номери вузлів МС, дата випуску; наробок МС із початку експлуатації; найменування експлуатаційної організації; види й операції ТО (ремонту); характеристика робочих місць; найменування операцій і елементів операцій; кваліфікація виконавців; початок і кінець часу виконання елементів операції з розподілом на сумарний і оперативний час; інтервал часу на виконання елементів операції по кожному виробу з поділом його на основний, допоміжний, підготовлюваний, складальний, додатковий сумарний і на відповідну трудомісткість; обсяг витрат запасних виробів (елементів) (найменування і кількість); витрати мастильних і допоміжних матеріалів (найменування і кількість).

Узагальнення даних про тривалість, трудомісткість і вартість операцій планових ТО і ремонтів продять шляхом складання карток-накопичувачів [21], які заповнюють зазвичай в організаціях, що експлуатують (використовують у виробничому процесі) і ремонтують вузли мехатронних систем.

Будь-яке дослідження рівня надійності МС в умовах експлуатації (виробництва) складається з таких етапів: підготовчі роботи, які передують

збору інформації; збір та оброблення інформації. Зміст кожного етапу може змінюватися залежно від цілей дослідження, специфіки досліджуваних засобів МС, умов експлуатації, організації збору інформації тощо. Розглянемо послідовність проведення робіт під час збору інформації обслуговим персоналом.

Попереднє оброблення інформації починається з її уточнення, оскільки записи про відмови можуть мати різну повноту [29]. Тому записи слід аналізувати із залученням обслугового персоналу (для доповнення й роз'яснення записів). Крім того, потрібно виключити інформацію про часові інтервали експлуатації зі зниженою регулярністю записів. Наведена інформація виявляється опитуванням обслугового персоналу і на основі спостережень за веденням експлуатації засобів МС.

Об'єднання вторинних відмов з первинними дає змогу надалі розглядати тільки ординарні потоки відмов. Оскільки інформацію про надійність збирає обслуговий персонал, після її оброблення доцільно проводити перевірку якості, яка розпочинається з вибору математичної моделі потоку відмов. Перед перевіркою регулярності й достовірності інформації необхідно вирівняти потік залежно від кількості вузлів МС, що працюють, та умов їх застосування.

Якщо немає апріорної інформації про залежність значення відносної інтенсивності від умов функціонування МС, то дані, отримані в часові інтервали, протягом яких значно змінювалися умови використання вузлів МС за призначенням, слід розглядати окремо. Після перевірки якості інформації визначають характеристики надійності.

Отриману інформацію групують за ознаками, які вибирають з огляду на особливості засобів експлуатованої МС і цілі дослідження. Перевірка можливості об'єднання результатів різних статистичних даних потрібна в тому випадку, якщо є деякі відмінності в умовах експлуатації (застосування) або конструкції МС.

11.3. Шляхи використання інформації про надійність мехатронних систем

Інформація про надійність, отримана під час експлуатації МС, використовується для вирішення таких основних завдань, пов'язаних із забезпеченням технічного обслуговування:

- уточнення прийнятої системи технічного обслуговування й коригування експлуатаційної документації на конкретні типи вузлів МС;
- оцінювання ефективності проведених заходів із попередження відмов і планування ремонту вузлів МС;
- коригування термінів проведення технічних обслуговувань і ремонтів, зазначених в експлуатаційній документації;
- уточнення переліку і змісту заходів, які виконуються під час ТО;
- визначення переліку елементів зі зниженими показниками надійності;
- коригування термінів експлуатації і технічного ресурсу вузлів мехатронних систем КІВ.

За результатами узагальнення даних про відмови й ремонт вузлів МС уточнюються найважливіші показники системи ТО (вартість технічних обслуговувань, їх тривалість, витрати сил і засобів тощо). У перспективних засобах МС, побудованих з використанням високоінтегрованого елементного базиса, питання технічного обслуговування не втратили своєї актуальності.

Установлено, що при досягнутих рівнях надійності напівпровідникових приладів, інтегральних мікросхем та інших виробів (елементів) масового виробництва недоцільно застосовувати групову профілактичну заміну елементів. Технічне обслуговування цих елементів має здійснюватися залежно від результатів вимірювання вихідних параметрів вузлів і блоків МС. Зазвичай його зводять до заміни вузлів (блоків) з подальшим їх відновленням у спеціалізованих ремонтних організаціях [22, 24].

Отримана інформація про відмови дає змогу виявити залежність між конструктивними особливостями засобів МС і тривалістю обслуговування. З досліджень випливає [19, 21, 22], що ця залежність визначається такими факторами, як доступність ремонту деталей і вузлів, можливість контролю роботоздатності вузлів МС, наявність контрольно-вимірювальних приладів, ступінь виконання вимог техніки безпеки тощо. Перелічені особливості конструкції впливають на час відновлення, від якого залежить значення коефіцієнта оперативної готовності засобів МС.

Показники обслуговування також залежать від досвіду технічного персоналу, який обслуговує і відновлює засоби МС у разі відмов. Якщо за одиницю взяти рівень обслуговування технічним персоналом, що має досвід роботи 25–30 місяців, то значення коефіцієнта досвідченості залежно від накопиченого досвіду буде характеризуватися показниками, наведеними в табл.11.1 [21].

Таблиця 11.1

Тривалість накопичення досвіду, міс.	5	10	20	25	30	35	понад 40
Значення коефіцієнта досвідченості	0.29	0.44	0.66	0.91	1.05	1.14	1.17

Дані, наведені в цій таблиці, є нормованими. Так, наприклад, можна очікувати, що фахівець, який має досвід роботи п'ять місяців і витрачає на роботу три години, після накопичення ним досвіду роботи протягом 25–30 місяців виконає своє завдання приблизно за одну годину.

Маючи наведену інформацію, можна більш повно врахувати всю специфіку факторів, що впливають на вибір системи технічного обслуговування конкретних МС.

Контрольні запитання

1. Назвіть критерії якості статистичної інформації про надійність вузлів мехатронних систем.
2. Дайте характеристику відомостей, необхідних для виявлення кількісних показників безвідмовності.
3. Назвіть відомості про умови експлуатації мехатронних систем, що використовуються для оцінювання надійнісних характеристик систем.
4. Дайте характеристику оперативної системи збирання інформації про відмови.
5. Дайте характеристику регулярної системи збирання інформації про відмови.
6. Назвіть шляхи збирання інформації про відмови вузлів МС.
7. Назвіть переваги й недоліки збирання обслуговим персоналом інформації про відмови.
8. Які завдання зібрана статистична інформація дає змогу вирішувати?
9. Назвіть мету збирання інформації про надійнісні характеристики вузлів мехатронних систем.

Розподіл Пуассона

Таблиця Д.1.1
Значення розподілу Пуассона для $\alpha < 1$

m	α								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,4066
1	0,0905	0,1638	0,2222	0,2681	0,3033	0,3293	0,3476	0,3595	0,3659
2	0,0045	0,0164	0,0333	0,0536	0,0758	0,0988	0,1217	0,1438	0,1647
3	0,0002	0,0019	0,0033	0,0072	0,0126	0,0198	0,0284	0,0383	0,0494
4		0,0001	0,0002	0,0007	0,0016	0,0030	0,0050	0,0077	0,0111
5				0,0001	0,0002	0,0004	0,0007	0,0012	0,0020
6							0,0001	0,0002	0,0003

Таблиця Д.1.2
Значення розподілу Пуассона для $\alpha \geq 1$

m	α									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,3679	0,1353	0,0183	0,0183	0,0067	0,0025	0,0009	0,0003	0,0001	0,0000
1	0,3679	0,2707	0,0498	0,0733	0,0337	0,0149	0,0064	0,0027	0,0011	0,0005
2	0,1389	0,2707	0,1494	0,1465	0,0842	0,0446	0,0223	0,0107	0,0050	0,0023
3	0,0613	0,1804	0,2240	0,1954	0,1404	0,0892	0,0521	0,0286	0,0150	0,0076
4	0,0153	0,0902	0,2240	0,1954	0,1755	0,1339	0,0912	0,0572	0,0337	0,0189
5	0,0029	0,0361	0,1680	0,1563	0,1755	0,1606	0,1277	0,0916	0,0607	0,0378
6	0,0005	0,0120	0,1008	0,1042	0,1462	0,1606	0,1490	0,1221	0,0911	0,0629
7	0,0001	0,0037	0,0504	0,0595	0,1044	0,1377	0,1490	0,1396	0,1171	0,0901
8		0,0009	0,0216	0,0298	0,0653	0,1033	0,1304	0,1396	0,1298	0,1126
9		0,0002	0,0081	0,0132	0,0363	0,0688	0,1014	0,1241	0,1298	0,1251
10			0,0027	0,0053	0,0181	0,0413	0,0710	0,0993	0,1186	0,1251
11			0,0008	0,0019	0,0082	0,0225	0,0452	0,0722	0,0970	0,1137
12			0,0002	0,0006	0,0034	0,0126	0,0263	0,0481	0,0728	0,0948
13			0,0001	0,0002	0,0013	0,0052	0,0142	0,0296	0,0504	0,0729
14				0,0001	0,0005	0,0022	0,0071	0,0169	0,0324	0,0521
15					0,0002	0,0009	0,0033	0,0090	0,0194	0,0347
16						0,0003	0,0014	0,0045	0,0109	0,0217
17						0,0001	0,0006	0,0021	0,0058	0,0128
18							0,0002	0,0009	0,0029	0,0071
19							0,0001	0,0004	0,0014	0,0037
20								0,0002	0,0006	0,0019
21								0,0001	0,0003	0,0009
22									0,0001	0,0004
23										0,0002
24										0,0001

Значення функції Лапласа $F(y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^y e^{-\frac{t^2}{2}} dt$

0,00	0,0000	0,30	0,1179	0,60	0,2257	0,90	0,2959	1,20	0,3849	1,50	0,4332
01	0040	29	1217	61	2291	91	2986	21	3869	51	4345
02	0080	32	1255	62	2324	92	3212	22	3888	52	4357
03	0120	33	1293	63	2357	93	3338	23	3907	53	4370
04	0160	34	1329	64	2389	94	3264	23	3925	54	4382
05	0199	35	1368	65	2422	95	3289	25	3944	55	4394
06	0239	36	1406	66	2454	96	3295	26	3962	56	4406
07	0279	37	1443	67	2486	97	3340	27	3980	57	4418
08	0299	38	1480	68	2517	98	3365	28	3997	58	4429
09	0359	39	1517	69	2549	99	3389	29	4015	59	4441
0,10	0,0398	0,40	0,1554	0,70	0,2580	1,00	0,3413	1,30	0,4032	1,60	0,445
11	0438	41	1591	71	2611	01	3438	29	4049	61	4463
12	0478	42	1628	72	2642	02	3461	32	4066	62	4474
13	0517	43	1664	73	2673	03	3485	33	4083	63	4484
14	0557	44	1700	74	2703	04	3508	34	4099	64	4495
15	0596	45	1736	75	2734	05	3529	35	4115	65	4505
16	0636	46	1772	76	2764	06	3554	36	4129	66	4515
17	0675	47	1808	77	2794	07	3577	37	4147	67	4525
18	0714	48	1844	78	2823	08	3599	38	4162	68	4535
19	0753	49	1879	79	2852	09	3621	39	4177	69	4545
0,20	0,0793	0,50	0,1915	0,80	0,2881	1,10	0,3643	1,40	0,4192	1,70	0,4554
21	0832	51	1950	81	2910	11	3665	41	4207	71	4564
22	0871	52	1985	82	2939	12	3686	42	4222	72	4573
23	0910	53	2019	83	2967	13	3708	43	4236	73	4582
24	0948	54	2054	84	2995	14	3729	44	4251	74	4591
25	0987	55	2088	85	3023	15	3746	45	4265	75	4599
26	1026	56	2123	86	3051	16	3770	46	4279	76	4608
27	1064	57	2157	87	3078	17	3790	47	4292	77	4616
28	1103	58	2190	88	2906	18	3810	48	4306	78	4625
29	1141	59	2224	89	2933	19	3830	49	4299	79	4633

Закінчення дод. 2

x	F(x)	x	F(x)	x	F(x)	x	F(x)	x	F(x)	x	F(x)
1,80	0,4641	1,90	0,4713	2,00	0,4772	2,20	0,4861	2,40	0,4918	2,60	0,4953
81	4649	91	4719	02	4783	22	4868	42	4922	62	4956
82	4656	92	4726	04	4793	24	4875	44	4927	64	4959
83	4664	93	4732	06	4803	26	4881	46	4929	66	4961
84	4671	94	4738	08	4812	28	4887	48	4934	68	4963
85	4678	95	4744	2,10	0,4821	2,30	4893	2,50	0,4938	2,70	0,4965
86	4686	96	4750	12	4830	32	4898	52	4941	72	4967
87	4693	97	4756	14	4838	34	4904	54	4945	74	4969
88	4699	98	4761	16	4846	36	4909	56	4948	76	4971
89	4706	99	4767	18	4854	38	4913	58	4951	78	4973

Значення функції $y = e^{-x}$ ($x < 4$)

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	1,0000	0,9900	0,9802	0,9704	0,9608	0,9512	0,9418	0,9324	0,9229	0,9139
0,1	0,9048	8958	8069	8781	8694	8607	8521	8437	8353	8270
0,2	8187	8106	8025	7945	7866	7788	7710	7634	7558	7483
0,3	7408	7334	7261	7189	7118	7074	6977	6907	6839	6771
0,4	6703	6636	6570	6505	6440	6376	6293	6250	6188	6126
0,5	6065	6005	5945	5086	5827	5769	5712	5655	5599	5543
0,6	5468	5433	5379	5326	5273	5220	5168	5117	5066	5016
0,7	4966	4916	1867	4019	4771	4774	4677	4630	4584	4538
0,8	1493	4449	4404	4360	4297	4724	4232	4189	4148	4107
0,9	4060	4025	3305	3945	3906	3867	3829	3791	3753	3716
1,0	0,3679	0,3642	0,3606	0,3570	0,3534	0,3499	0,3465	0,3430	0,3396	0,3362
1,1	3329	3296	3263	3230	2998	2966	2935	2904	3073	3042
1,2	3012	2982	2952	2923	2894	2865	2836	2808	2780	2753
1,3	2725	2698	2671	2645	2618	2592	2567	2541	2516	2491
1,4	2466	2441	2417	2393	2369	2346	2322	2299	2276	2254
1,5	2229	2209	2187	2165	2144	2123	2101	2080	2060	2039
1,6	2019	1999	1979	1959	1940	1920	1901	1882	1864	1845
1,7	1827	1809	1791	1773	1755	1736	1720	1703	1686	1670
1,8	1653	1636	1620	1604	1588	1572	1557	1541	1526	1511
1,9	1496	1481	1466	1451	1437	1423	1409	1395	1381	1367
2,0	0,1353	0,1340	0,1327	0,1293	0,1300	0,1287	0,1275	0,1262	0,1249	0,1237
2,1	1225	1212	1200	1188	1177	1165	1153	1142	1130	1119
2,2	1108	1097	1086	1075	1065	1054	1043	1033	1023	1013
2,3	1003	0993	0983	0973	0963	0954	0944	0935	0926	0916
2,4	0907	0898	0889	0880	0872	0863	0854	0846	0837	0829
2,5	0821	0813	0805	0797	0789	0781	0773	0765	0758	0750
2,6	0743	0735	0728	0721	0714	0707	0700	0693	0686	0679
2,7	0672	0665	0659	0652	0646	0639	0633	0627	0620	0614
2,8	0603	0602	0596	0590	0584	0578	0573	0567	0561	0556
2,9	0550	0545	0539	0534	0529	0523	0518	0713	0508	0503
3,0	0,0498	0,0493	0,0488	0,0483	0,0478	0,0474	0,0469	0,0464	0,0460	0,0455
3,1	0450	0446	0442	0437	0433	0429	0424	0420	0416	0412
3,2	0408	0404	0400	0396	0392	0388	0384	0380	0376	0373
3,3	0369	0365	0362	0358	0354	0351	0347	0344	0340	0337
3,4	0334	0330	0327	0324	0321	0297	0294	0291	0308	0305
3,5	0302	0299	0296	0293	0290	0287	0284	0282	0279	0276
3,6	0273	0271	0268	0265	0263	0260	0257	0255	0252	0250
3,7	0247	0245	0242	0240	0238	0235	0233	0229	0228	0226
3,8	0224	0221	0219	0217	0215	0213	0211	0209	0207	0204
3,9	0202	0200	0198	0196	0194	0193	0191	0189	0187	0185

Значення функції $y = e^{-x}$ ($x \geq 4$)

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4,0	0,0183	0,0181	0,0180	0,0178	0,0176	0,0174	0,0172	0,0171	0,0169	0,0167
4,1	0166	0164	0162	0161	0159	0158	0156	0155	0153	0151
4,2	0150	0148	0147	0146	0144	0143	0141	0140	0138	0137
4,3	0136	0134	0133	0132	0130	0129	0128	0127	0125	0124
4,4	0123	0122	0120	0110	0118	0117	0116	0114	0113	0112
4,5	0111	0110	0109	0108	0107	0106	0105	0104	0103	0102
4,6	0101	0100	0099	0098	0097	0096	0095	0094	0093	0092

Значення інтенсивностей відмов елементів вузлів мехатронних систем

Назва елемента	Інтенсивність		
	Максимальна	Середня	Мінімальна
Випрямляч селеновий	1,60	1,16	0,32
Виконавчий двигун	42	29	21
Генератор змінного струму	2,94	0,7	0,033
Генератор низькочастотний	2,41	0,9	0,40
Гніздо	0,02	0,01	0,002
Двигун асинхронний	11,2	8,6	4,49
Двигун вентиляторний	19,0	2,25	0,159
Двигун гідравлічний	170	130	110
Двигун кроковий	0,71	0,37	0,22
Двигун синхронний	6,25	0,359	0,17
Діод високовольтний	-	5,49	-
Діод германієвий	0,678	0,157	0,002
Діод кремнієвий	0,452	0,2	0,021
Діод точковий	1,47	0,2	0,16
Дросель високочастотний	4,75	2,1	0,056
Дросель низькочастотний	0,28	0,175	0,07
Дросель фільтра	0,25	0,03	0,012
Зажим, клема	0,0009	0,0005	0,0003
Запобіжник дротовий	0,83/к	0,5/к	0,38/к
Запобіжник плавкий	2,75	0,5	0,001
Колодка перехідна роз'єд- нувальна	12,3	5,2	0,8
Конденсатор електролітичний	0,513	0,035	0,003
Конденсатор керамічний	1,64	0,15	0,042
Конденсатор паперовий	0,04	0,025	0,01
Конденсатор плівковий	0,178	0,135	0,003
Конденсатор постійний	2,385	0,325	0,1325
Конденсатор прохідний	4,42	2,95	0,088
Конденсатор слюдяний	0,066	0,0375	0,025
Конденсатор танталовий	1,934	0,6	0,103
Контактор	34	20	12
Лампа неонова	1,52	0,1	0,019
Лампа розжарювання	1,1	0,64	0,34
Лічильник електричний	5,77	0,036	0,005
Магніт	7,11	5,65	2,02

Назва елемента	Інтенсивність		
	Максимальна	Середня	Мінімальна
Манометр гідравлічний	52	37	21
Манометр пневматичний	48	37	19
Муфта електромагітна	290	350	390
Мікросхема високочастотна	0,9	0,64	0,2
Мікросхема імпульсна	0,4	0,82	0,23
Мікросхема імпульсна потужна	1,12	0,95	0,48
Мікросхема низькочастотна	1,0	0,55	0,1
Панелька для мікросхем	0,009/г	0,005/г	0,002/г
Перемикач блокувальний	1,0/кг	0,5/кг	0,25/кг
Перемикач кноповий	0,11/кг	0,07/кг	0,043/кг
Перемикач мікромініатюрний	0,5/кг	0,25/кг	0,09/кг
Перемикач потужнй	—	0,07/кг	—
Підсилювач магнітний	0,855	0,085	0,002
Поршень гідравлічний	5	7	9
Потенціометр	15,9	3,0	0,018
Потенціометр дротовий	2,05	1,4	0,137
Потенціометр вугільний	4,44	0,25	0,1
Провідник	0,436	0,019	0,003
Провідник з'єднувальний	0,12	0,015	0,008
Пускач, стартер	16,1	10,0	3,03
Регулятор напруги	13,16	8,82	0,37
Резистор дротовий	0,197	0,087	0,046
Резистор змінний	0,33	0,053	0,007
Резистор композиційний	1,0	0,159	0,001
Резистор плівковий	0,058	0,03	0,0017
Резистор постійний	0,07	0,03	0,01
Реле електромагнітне	0,5/кг	0,3/кг	0,11/кг
Реле загального призначення	0,48/кг	0,25/кг	0,1/кг
Реле затримки часу	0,749	0,39	0,156
Реле малогабаритне	0,54/кг	0,25/кг	0,145/кг
Реле мініатюрне	0,25 /кг	0,0 6/кг	0,03/кг
Реле потужне	4,1/кг	0,3/кг	0,15/кг
Реле термічне	1,0/кг	0,4/кг	0,12/кг
Реле швидкодійне	113/кг	0,7/кг	0,42/кг
Рознім штепсельний	0,90	0,163	0,10
Рознім штепсельний коаксіальний	0,193/ш	0,00 3/ш	0,001/ш
Сельсин	0,61	0,35	0,09

Назва елемента	Інтенсивність		
	Максимальна	Середня	Мінімальна
Серводвигун	5,61	1,51	0,101
Соленоїд	0,55	0,05	0,036
Стабілізатор напруги газорозрядний	2,5	1,0	0,4
Термістор	1,4	0,6	0,2
Термоперемикач	0,261/кг	0,16/кг	0,114/кг
Транзистор германієвий малопотужний	1,4	0,7	1,91
Транзистор германієвий потужний	1,4	0,6	0,33
Транзистор кремнієвий малопотужний	1,44	0,84	0,45
Транзистор кремнієвий середньої потужності	0,84	0,74	0,21
Трансформатор вихідний	0,2	0,09	0,04
Трансформатор вхідний	2,08	1,09	0,12
Трансформатор імпульсний	0,235	0,17	0,03
Трансформатор силовий	1,69	0,5	0,03
Трансформатор розв'язувальний	0,093	0,03	0,011
Тримач запобіжників	0,1	0,02	0,008
Фільтр вхідний	1,62	0,3	0,01
Щіткотримач	4,11	1	0,87

Примітка. Для отримання значень інтенсивностей відмов елементів, що мають розмірність год^{-1} , необхідно наведені в таблиці величини помножити на 10^{-6} . Перед деякими значеннями інтенсивностей відмов через навскісну риску вказано найменування: к (контакт), ш (штирок), г (гніздо), кг (контактна група), в (вивід), які є показниками того, що цю величину наведено для однієї деталі елемента. Якщо елемент містить кілька таких деталей, то для отримання величини інтенсивності відмов табличне значення необхідно помножити на кількість деталей в елементі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Благодарний, М. П. Інформаційні та виконавчі мікромашини мехатронних комплексів транспортних засобів [Текст] : консп. лекцій / М. П. Благодарний, О. П. Алексієв. — Х. : ХНАДУ, 2006. — 150 с.
2. Благодарний, М. П. Основи побудови цифрових систем мехатронних комплексів автотранспортних засобів [Текст] : консп. лекцій / М. П. Благодарний, О. П. Алексієв, Г. М. Тимонькін. — Х. : ХНАДУ, 2005. — 116 с.
3. Голобородько, О. О. Мехатронні системи автомобільного транспорту [Текст] : навч. посіб. / О. О. Голобородько, В. В. Редчиць, О. М. Коробочка. — Х. : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. — 300 с.
4. Подураев, Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение [Текст] : учеб. пособие / Ю. В. Подураев. — М. : Машиностроение, 2006. — 256 с.
5. Введение в мехатронику [Текст] : учеб. пособие / О. М. Яхно, А. В. Узунов, А. Ф. Луговской, А. П. Губарев. — К. : НТУУ «КПИ». — 528 с.
6. Подлесный, Н. И. Элементы систем автоматического управления и контроля [Текст] : учеб. пособие / Н. И. Подлесный, В. Г. Рубанов. — К. : Вища шк., 1992. — 473 с.
7. Основи цифрових систем [Текст] : підруч. / М. П. Благодарний, В. С. Харченко, В. М. Ілюшко та ін. ; за ред. В. С. Харченка, М. П. Благодарного. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2002. — 672 с.
8. Пальчевський, Б. О. Автоматизація технологічних процесів (виготовлення та пакування виробів) [Текст] : навч. посіб. / Б. О. Пальчевський. — Л. : Світ, 2007. — 392 с.
9. Основи діагностики цифрових систем [Текст] : підруч. / В. С. Харченко, Є. А. Артеменко, М. П. Благодарний, В. М. Ілюшко. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2004. — 665 с.
10. Якобсон, Б. М. Автоматизированные системы управления производством [Текст] : учеб. пособие / В. М. Якобсон, А. Е. Розинкин. — М. : Сов. радио, 1971. — 224 с.
11. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики [Текст] : учеб. пособие / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, О. В. Невзоров. — М. : Транспорт, 1995. — 272 с.
12. Контроль функционирования больших систем [Текст] : монография / Г. П. Шибанов, Е. А. Артеменко, А. А. Метешкин, Н. И. Циклинский. — М. : Машиностроение, 1977. — 360 с.
13. Артеменко, Е. А. Основы теории прохождения сигналов и ее приложение к телемеханике [Текст] : учебник / С. Н. Терентьев, Е. А. Артеменко, В. А. Кедрус. — М. : МО СССР, 1975. — 447 с.

14. Артеменко, Е. А. Основы построения систем контроля и управления сложными техническими объектами [Текст] : учебник / Е. А. Артеменко. — М. : МО СССР, 1985. — 303 с.
15. Волков, Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов [Текст] : учебник / Л. И. Волков. — М. : Высш. шк., 1981. — 278 с.
16. Журавлев, Ю. П. Надежность и контроль ЭВМ [Текст] : монография / Ю. П. Журавлев, Л. А. Котелюк, Н. И. Циклинский. — М. : Сов. радио, 1978. — 416 с.
17. Дедков, В. К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем [Текст] : учеб. пособие / В. К. Дедков, Н. А. Северцев. — М. : Высш. шк., 1976. — 405 с.
18. Долгов, В. А. Радиоэлектронные автоматические системы контроля [Текст] : монография / В. А. Долгов, А. С. Касаткин, В. Н. Сретенский. — 1978. — 384 с.
19. Надежность технических систем [Текст] : справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. ; под ред. И. А. Ушакова. — М. : Радио и связь, 1985. — 608 с.
20. Жураковский, Ю. П. Передача информации в ГАП [Текст] : учеб. пособие / Ю. П. Жураковский. — К. : Вища шк., 1991. — 216 с.
21. Алексенко, А. Я. Эксплуатация радиотехнических систем [Текст] : учеб. пособие / А. Я. Алексенко, И. В. Адерихин. — М. : Воениздат, 1980. — 223 с.
22. Леонов, А. И. Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры [Текст] : учебник / А. И. Леонов, Н. Ф. Дубровский. — М. : Легпромбытиздат, 1991. — 272 с.
23. Платонов, Ю. М. Диагностика, ремонт и профилактика персональных компьютеров [Текст] : справочник / Ю. М. Платонов, Ю. Г. Уткин. — М. : Горячая линия – Телеком, 2003. — 292 с.
24. Локазюк, В. М. Надійність, контроль, діагностика і модернізація ПК [Текст] : навч. посіб. / В. М. Локазюк, Ю. Г. Савченко. — К. : Вид. центр «Академія», 2004. — 376 с.
25. Слабарь, А. А. Эксплуатация средств вычислительной техники [Текст] : учебник / А. А. Слабарь, В. А. Смагин, С. М. Шептуха. — М. : МО СССР, 1987. — 324 с.
26. Терехов, Н. К. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры, [Текст] : учеб. пособие / Н. К. Терехов. — Харьк. высш. командно-инж. уч-ще, 1971. — Ч.2. — 289 с.
27. Благодарний, М. П. Пристрої і методи контролю технологічних процесів [Текст] : навч. посіб. / М. П. Благодарний, І. П. Внуков, Г. М. Тимонькін. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2013. — 180 с.
29. Рипс, А. Я. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами [Текст] : монография / Я. А. Рипс, Б. А. Савельев. — М. : Энергия, 1974. — 248 с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Мехатронні системи і комплекси.....	4
1.1. Основні положення й означення мехатроніки.....	4
1.2. Мехатронні системи.....	5
1.3. Мехатронні комплекси.....	7
1.4. Рівні інтеграції мехатронних систем.....	12
2. Вузли мехатронних систем	15
2.1. Виконавчі пристрої.....	15
2.1.1. Електричні приводи.....	16
2.1.2. Пневматичні приводи.....	17
2.1.3. Гідравлічні приводи.....	18
2.1.4. П'єзоелектричні приводи.....	19
2.1.5. Електромагнітні приводи.....	19
2.1.6. Перспективні виконавчі пристрої.....	20
2.2. Засоби контролю технологічних процесів.....	20
2.3. Засоби оброблення даних у мехатронних системах.....	28
2.3.1. Вимоги до способів оброблення даних.....	28
2.3.2. Узагальнена структурна схема електронного блока керування.....	31
2.4. Канали обміну інформацією в мехатронних системах.....	33
2.4.1. Загальні відомості.....	33
2.4.2. Механічні канали.....	40
2.4.3. Акустичні канали.....	40
2.4.4. Електричні канали.....	40
2.4.5. Радіоканали.....	42
2.4.6. Оптичні канали.....	44

3.	Життєвий цикл і характеристики мехатронних систем.....	44
3.1.	Стадії життєвого циклу мехатронних систем.....	44
3.2.	Основні технічні характеристики мехатронних систем.....	46
3.3.	Експлуатаційні властивості мехатронних систем.....	51
3.4.	Класифікація мехатронних систем.....	56
4.	Фактори впливу на готовність мехатронних систем.....	62
4.1.	Об'єктивні фактори впливу на готовність мехатронних систем.....	62
4.2.	Суб'єктивні фактори впливу на готовність мехатронних систем.....	69
5.	Показники надійності мехатронних систем.....	72
5.1.	Показники безвідмовності.....	72
5.2.	Показники збережаності й довговічності.....	80
5.3.	Показники ремонтпридатності.....	81
5.4.	Показники надійності системи людина — машина.....	83
5.5.	Показники надійності резервних мехатронних систем і комплексів.....	88
6.	Готовність мехатронних систем.....	93
6.1.	Основні положення.....	93
6.2.	Показники готовності.....	95
6.3.	Готовність мехатронних систем з урахуванням динаміки функціонування.....	103
7.	Основні етапи експлуатації.....	110
7.1.	Загальні поняття експлуатації мехатронних систем.....	110
7.2.	Види й етапи експлуатації мехатронних систем.....	111
7.3.	Уведення виробів в експлуатацію.....	113
7.4.	Заходи з підтримки вузлів мехатронних систем у готовності до застосування.....	115
8.	Технічне обслуговування.....	118

8.1.	Технічне обслуговування і його види.....	118
8.2.	Показники якості технічного обслуговування.....	120
8.3.	Контроль технічного стану мехатронних систем.....	124
8.4.	Методика розрахунку комплекту запасних елементів для вузлів мехатронних систем.....	135
9.	Ремонт мехатронних систем.....	142
9.1.	Ремонт і його види.....	142
9.2.	Показники якості ремонту.....	146
10.	Зберігання мехатронних систем.....	147
10.1.	Зберігання і його види.....	147
10.2.	Показники якості зберігання.....	151
11.	Шляхи отримання і використання інформації про технічний стан мехатронних систем.....	153
11.1	Вимоги до статистичних даних про надійність мехатронних систем.....	153
11.2.	Організація збору і послідовність оброблення статистичних даних.....	157
11.3.	Шляхи використання інформації про надійність мехатронних систем.....	160
Додаток 1.	Розподіл Пуассона.....	163
Додаток 2.	Значення функції Лапласа	164
Додаток 3.	Значення функції $y = e^{-x}$	166
Додаток 4.	Значення інтенсивностей відмов елементів вузлів мехатронних систем.....	168
Бібліографічний список.....		171

Навчальне видання
Благодарний Микола Петрович
Внуков Ігор Павлович

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
МЕХАТРОННИХ КОМПЛЕКСІВ

Редактор О. Ф. Серьожкіна

Зв. план, 2014

Підписано до друку 22.08.2014

Формат 60×84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. Друк

Ум. друк. арк. 9,8. Обл.-вид. арк. 11. Наклад 50 пр.

Замовлення 283. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001