



Міністерство освіти и науки України

УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ

Кафедра автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

О. О. Прокопенко, Н.С. Антоненко

НАДІЙНІСТЬ І ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ

Навчально-методичний посібник

Харків

2024

Міністерство освіти и науки України
УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ
Кафедра автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

О. О. Прокопенко, Н.С. Антоненко

НАДІЙНІСТЬ І ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ

Навчально-методичний посібник

*Для студентів освітнього ступеню «магістр»
денної і заочної форм навчання
спеціальності
015.35 Професійна освіта
(Видобуток, переробка та транспортування корисних копалин)*

Затверджено
Науково-методичною радою
Української інженерно-педаго-
гічної академії
протокол № 7
від 18.06.2024 р.

Харків
2024

УДК 622.276:620.179.1:378.147

Прокопенко О. О.

Надійність і подовження ресурсу об'єктів нафтогазової галузі : навч.-метод. посіб. для студ. ОС «магістр» денної и заочн. форм навч. спец. 015.35 Професійна освіта (Видобуток, переробка та транспортування корисних копалин) / О.О. Прокопенко, Н.С. Антоненко; Укр. інж.-пед. акад. – Харків: [б. в.], 2024. – 114 с.

Навчально-методичний посібник "Надійність і подовження ресурсу об'єктів нафтогазової галузі" орієнтований на надання допомоги здобувачів освіти в придбанні знань теорії надійності і набуття умінь застосовувати їх для вирішення виробничих завдань з забезпечення надійності і визначення технічного ресурсу нафтогазового обладнання.

Навчально-методичний посібник адресований здобувачам освіти ОС "магістр" денної і заочної форм навчання.

Рецензент : Г. І. Канюк, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний за випуск : Г. І. Канюк, д-р техн. наук, проф.

© Прокопенко О.О. Антоненко Н.С., 2024

© УІПА, 2024

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АСУ ТП	— автоматизована система управління технологічним процесом
ІВ	— інтенсивність відмов;
ЙБР	— ймовірність безвідмовної роботи;
ЙВ	— ймовірність відмови;
КС	— компресорна станція;
ПЕК	— паливно-енергетичний комплекс;
СКВ	— середнє квадратичне відхилення;
ЩРВ	— щільність розподілу відмов;

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
ТЕМА 1: СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ.....	8
1.1 Основні вимоги до забезпечення надійності об'єктів нафтогазової галузі.....	9
1.2 Фактори, що впливають на надійність обладнання нафтогазової галузі	11
1.3 Підходи до технічного обслуговування нафтогазового обладнання	12
1.3.1 Система планово-попереджувальних ремонтів.....	13
1.1.2 Система обслуговування по фактичному технічному стану	14
Контрольні питання.....	15
ТЕМА 2: ОСНОВНІ ПРИЧИНИ ВІДМОВ НА ОБ'ЄКТАХ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ.....	16
2.1 Причини відмов на магістральному трубопроводному транспорті.....	16
2.2 Причини відмов на об'єктах нафтогазовидобутку	17
2.3 Причини відмов на нафтоперекачувальних станціях	18
2.4 Відмови на резервуарах	18
2.5 Відмови на компресорних станціях.....	19
Контрольні питання.....	20
ТЕМА 3: ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ	21
3.1 Мета і основні завдання теорії надійності	22
3.2 Надійність технічного об'єкту	23
Контрольні питання.....	26
ТЕМА 4: ТЕХНІЧНИЙ СТАН ОБ'ЄКТУ, ЙОГО ВИДИ ТА ЗМІНИ.....	27
4.1 Технічний стан. Види технічного стану.....	27
4.2 Властивості технічного стану	29
4.3 Події зміни технічного стану об'єктів	30
4.4 Технічний ресурс обладнання та його подовження.....	31
4.5 Фізична сутність надійності	34
Контрольні питання.....	35
ТЕМА 5: ВІДМОВИ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ. ПОКАЗНИКИ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ.....	36
5.1 Процеси, які призводять до відмов об'єктів	36
5.2 Відмови технічних об'єктів.....	37
5.2.1 Відмови технічних об'єктів за спроможністю виконання функцій	37
5.2.2 Відмови технічних об'єктів за характером прояву	38
5.2.3 Відмови технічних об'єктів за трудомісткістю усунення	38
5.2.4 Відмови технічних об'єктів за причинами виникнення (за походженням) .	38

5.2.5 Відмови технічних об'єктів за впливом на стан	39
5.2.6 Відмови за характером виникнення і можливістю прогнозування	39
5.2.7 Відмови технічних об'єктів за залежністю	39
5.2.8 Відмови технічних об'єктів за характером виявлення	39
Контрольні питання.....	40
ТЕМА 6: МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ	41
6.1 Основні визначення теорії ймовірності	41
6.2 Закон розподілу випадкової величини	42
6.3 Щільність розподілу випадкової величини	46
6.4 Основні числові характеристики випадкової величини	47
Контрольні питання.....	48
ТЕМА 7: ЯКІСТЬ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕКОНОМІЧНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ.....	50
7.1 Якість і надійність технічних об'єктів і систем	50
7.2 Надійність об'єктів і систем та їхня ефективність.....	51
7.3 Економічні показники надійності.....	52
Контрольні питання.....	54
ТЕМА 8: ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ.....	55
8.1 Показники безвідмовності невідновлюваних об'єктів.....	55
8.1.1 Ймовірнісне визначення	56
8.1.2 Статистичне визначення	59
8.1.3 Показники розсіювання	60
8.2 Показники надійності відновлюваних об'єктів	61
8.3. Закони розподілу, що використовуються в теорії надійності	66
8.3.1. Нормальний розподіл	66
8.3.2. Експонентний розподіл.....	67
8.3.3. Розподіл Вейбулла.....	68
Контрольні питання.....	68
ТЕМА 9: СТРУКТУРНО - ЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	70
9.1 Суть структурно-логічного аналізу технічних систем	70
9.2 Загальна схема аналізу структурної надійності технічних систем	71
9.3 Види з'єднання елементів в технічних системах	72
Контрольні питання.....	73
ТЕМА 10: РОЗРАХУНОК СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ.....	74
10.1. Системи з послідовним з'єднанням елементів	74
10.2 Системи з паралельним з'єднанням елементів	76
10.3 Системи типу " m з n "	78

10.4 Мостові схеми	80
10.5. Комбіновані системи	86
Контрольні питання	87
ТЕМА 11: ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ТЕХНІЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ	89
11.1 Технічні і технологічні системи яка об'єкти забезпечення надійності і довговічності	89
11.2 Класифікація методів підвищення і підтримки надійності систем	90
11.3 Методи підвищення надійності, що застосовуються при проектуванні	90
11.4 Методи підвищення надійності, що застосовуються при виготовленні	96
11.5 Методи підтримки надійності, що застосовуються при експлуатації	97
Контрольні питання	99
ТЕМА 12: СТРУКТУРНЕ РЕЗЕРВУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	100
12.1 Резервування технічних систем	100
12.2 Класифікація способів резервування	101
12.3. Кратність структурного резервування	103
12.4 Розрахунок надійності систем з резервуванням	105
Контрольні питання	108
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	109
Додаток А	110
Додаток Б	111
Додаток В	112
Додаток Г	113

ВСТУП

Навчальну дисципліну «Надійність і подовження ресурсу об'єктів нафтогазової галузі» здобувачі освіти освітнього рівня «магістр» спеціальності 015.35 Професійна освіта (Видобуток, переробка та транспортування корисних копалин) вивчають в обсязі 7,5 кредитів ECTS (225 годин). Навчальним планом спеціальності передбачено проведення лекцій, практичних занять та самостійна робота здобувачів освіти.

Метою навчальної дисципліни є підготовка фахівців, які мають знання теорії надійності та які спроможні застосовувати їх для вирішення виробничих завдань з забезпечення надійності і визначення технічного ресурсу об'єктів нафтогазової галузі.

Завданням дисципліни формування у здобувачів освіти чіткої системи теоретичних знань основ теорії надійності, вимог нормативних документів в галузі; та практичних вмінь забезпечення безпечної експлуатації об'єктів нафтогазової галузі.

Знання, отримані здобувачами освіти при вивченні даної дисципліни знадобляться при виконанні і захисті магістерської кваліфікаційної роботи та при рішенні практичних завдань на виробництві.

В курсі розглядаються питання надійності нафтогазового обладнання, методи його визначення та подовження його ресурсу.

Забезпечення безвідмовної експлуатації технологічних об'єктів і систем та безаварійності роботи є однією з головних задач нафтогазової галузі. Вирішення її утруднене тим, що обладнання галузі відносять до об'єктів підвищеної небезпеки, які функціонують в складних умовах.

Експлуатація, обслуговування, ремонт і монтаж обладнання є завданням інженерно-технічного персоналу з експлуатації та ремонту нафтогазового устаткування, а визначення. Допуск до експлуатації та призначення ресурсу обладнання об'єктів нафтогазової галузі здійснюють експерти технічні з промислової безпеки – атестовані фахівці, які мають право проводити технічний огляд та/або експертне обстеження відповідно до напряму:

- проведення технічного огляду та/або експертного обстеження обладнання нафтогазовидобувної промисловості;
- проведення технічного огляду та/або експертного обстеження обладнання газової промисловості.

Важним напрямком в забезпеченні безаварійності функціонування нафтогазової галузі є своєчасне проведення обстеження технологічного обладнання, визначення його фактичного технічного стану та характеристик надійності і встановлення граничних термінів і умов експлуатації.

ТЕМА 1: СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ

- 1.1 Основні вимоги до забезпечення надійності об'єктів нафтогазової галузі.
- 1.2 Фактори, що впливають на надійність обладнання нафтогазової галузі.
- 1.3 Підходи до технічного обслуговування нафтогазового обладнання.

1.1 Основні вимоги до забезпечення надійності об'єктів нафтогазової галузі

Нафтогазова галузь входить до складу паливно-енергетичного комплексу (ПЕК), що є частиною (підсистемою) великої системи - народного господарства. Паливно-енергетичний комплекс являє собою сукупність підприємств і установок отримання, переробки, перетворення, транспорту, зберігання і використання енергетичних ресурсів та енергоносіїв всіх видів.

Нафтогазова галузь відрізняється широким спектром технологічного обладнання, яке експлуатується в умовах агресивного середовища (висока корозійна активність, високі температура і тиск, наявність змінних температурних деформацій, вплив хімічних елементів, а також зовнішні механічні впливи та ін.).

Надійність є основним показником роботи будь-якого обладнання, що використовується в нафтогазовій галузі. Поточний рівень надійності впливає на якість, ефективність стану, на наявність ризиків, а також на інші показники, що характеризують роботу нафтогазового обладнання. У зв'язку з цим особлива увага приділяється забезпеченню належного рівня надійності на об'єктах нафтогазової промисловості і на системах трубопровідного транспорту вуглеводнів.

Сучасне обладнання нафтогазової галузі характеризується значним різноманіт-
ням конструкцій машин і агрегатів, обумовленим надзвичайно широким діапазоном технологічних функцій, поєднаних до того ж різноманітністю типорозмірів і модифікацій [1]. Крім того, значні відмінності мають умови експлуатації: виробничо-технологічні особливості, вплив факторів несприятливих умов зовнішнього середовища, високий рівень і нестаціонарність діючих навантажень і швидкостей, і як наслідок, часто недостатній рівень функціональної надійності.

Останнє пов'язано з значним обсягом ремонтно-відновлювальних робіт, з частою заміною відпрацьованих свій ресурс вузлів і агрегатів. А це вимагає в свою чергу підвищення технічного рівня і надійності застосовуваного нафтогазового обладнання, поліпшення його техніко-економічних і експлуатаційних показників.

Тому одним з важливих напрямків в проблемі управління надійністю нафтогазової галузі є вдосконалення методів визначення технічного стану обладнання.

Надійність і безпека обладнання закладається при його проектуванні, забезпечується при виготовленні, контролюється при експлуатації і відновлюється при ремонті.

Етап проектування і виготовлення формує початковий рівень надійності, який враховує конструкційні схеми певних елементів, а також інші технологічні особливості.

Забезпечення необхідної надійності об'єкта залежить не тільки від рівня конструкторської розробки, але і від прийнятої технології виробництва, якості матеріалів, культури та організації технічного обслуговування і ремонту. У свою чергу експлуатаційні властивості обладнання в значній мірі залежать від забезпечення обґрунтованості конструкторського рішення.

Досягнення і підтримання необхідного рівня надійності на етапі експлуатації - це розробка методів і засобів визначення технічного стану обладнання, підтримка властивостей надійності, заданих на етапі проектування.

Функціонування об'єктів нафтогазової галузі вимагає постійного рішення завдання забезпечення необхідної високої надійності. Як і всі технічні об'єкти, об'єкти нафтогазової галузі в процесі експлуатації зазнають фізичний знос і моральне старіння. Фізичний знос полягає в тому, що старіють матеріали (метал і ізоляція), накопичуються всілякі дефекти (корозія, втома, знос), знижується міцність. Моральне старіння полягає в тому, що вимоги до об'єктів нафтогазової галузі з часом змінюються, нормативні документи переробляють в міру отримання нових знань, досвіду і в відповідно до сучасних законів.

Об'єкти нафтогазової галузі призначені для виконання своїх функцій протягом заданого терміну. З експлуатаційної точки зору хотілося б мати такі об'єкти, в яких всі вузли і елементи безвідмовно і якісно відпрацьовували б заданий термін, після якого їх можна було б повністю замінити. Однак створення «ідеальних» об'єктів зажадало б великих часових і фінансових витрат. Зазвичай ставлять більш реальні цілі – споруджувати об'єкти, які задовольняють функціональним призначенням і є простими і надійними в експлуатації.

Досягнення критичного рівня ушкодження, що з'явилися в процесі експлуатації, призводять до порушення працездатного стану обладнання і, отже, до його відмови. Актуальною проблемою експлуатації обладнання нафтогазового комплексу є прогнозування появи та розвитку дефектів, що тягнуть за собою техногенні катастрофи.

Для вирішення цієї проблеми необхідно застосування нових підходів, спрямованих на прогнозування безпеки і надійності, а також ефективні методики, що знижують потенційні ризики та негативні наслідки відмов.

Рішення проблеми забезпечення безвідмовної роботи системи здобутку, транспортування, зберігання та переробки вуглеводнів є надзвичайно важливим завданням.

Транспортування при високому тиску великих обсягів нафти і газу вимагає особливої уваги до питань збереження цілісності нафтогазопроводів та інших технологічних об'єктів, попередження відмов, аварій. В процесі експлуатації нафтогазопроводів виникає безліч проблем, пов'язаних із забезпеченням безпечної роботи. На об'єктах, що входять до складу систем нафтогазової галузі виникають різні дефекти. Руйнування їх призводить до скорочення видобутку нафти і газу, до зменшення обсягів його транспортування, до великого збитку, погіршення екологічної ситуації і витрат великих фінансових ресурсів для ліквідації аварій.

В цілому виникає необхідність системного підходу до вирішення окремих завдань і проблеми підвищення надійності обладнання нафтогазової галузі, зростає значення дослідження причин відмов різних видів агрегатів, досліджень в області забезпечення надійності і високого рівня експлуатаційної готовності на основі підвищення ресурсу та забезпечення ремонтної технологічності техніки.

1.2 Фактори, що впливають на надійність обладнання нафтогазової галузі

Експлуатаційні фактори породжують специфічність і складність роботи нафтогазового обладнання [7]. До цих факторів зазвичай відносять:

- масивність обладнання, призначеного для переміщення значних тягарів і великих обсягів рідких або газоподібних продуктів;
- динамічний характер навантаження обладнання та його деталей;
- агресивність робочих середовищ;
- тепловий режим роботи обладнання;
- кліматичний режим експлуатації.

Найчастіше умови експлуатації нафтогазового обладнання характеризують поєднанням декількох факторів, що ведуть до виникнення відмов. Це можна показати на прикладі роботи штока поршневого насоса видобувного обладнання.

В процесі зворотно-поступального руху шток відчуває знакозмінні навантаження стиснення, що чергуються з розтягуванням. Це викликає накопичення втомних напружень в тілі штока, що може стати причиною його втомного руйнування. Ситуація ускладнюється тим, що шток працює в абразивно-корозійному середовищі розчину, що перекачується. Абразивні механічні частинки, деформуючи ущільнювальні елементи і затримуючись в них, наносять подряпини на поверхню штока у вигляді рисок і задирів. Ці дефекти стають концентраторами напружень, перетворюючись в мережу дрібних тріщин, що розповсюджуються углиб тіла штока і сприяють його руйнуванню. Прогресуванню цього процесу сприяє також корозія, що виникає під впливом хімічних сполук, що містяться в перекачується розчині. Хімікати і солі

пластових вод, потрапляючи в мережу дрібних тріщин, вступають в хімічну реакцію з металом, порушують структуру металевих зв'язків, поглиблюють мережу тріщин, знижують механічну міцність конструкції, прискорюють її руйнування.

Таким чином, сукупність експлуатаційних факторів, що впливають на деталі і вузли нафтогазового обладнання в процесі експлуатації, визначаються як несталий або нестаціонарний режим напруження елементів, що підкоряється закономірностям випадкових явищ.

1.3 Підходи до технічного обслуговування нафтогазового обладнання

Організація експлуатації технічних об'єктів систем істотно впливає на їх надійність. Серед заходів, спрямованих на підвищення експлуатаційної надійності систем важливе місце відводять технічному обслуговуванню.

Під технічним обслуговуванням (ТО) розуміють комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на попередження відмов, на забезпечення справного стану обладнання в процесі експлуатації і готовності до його використання.

До основних завдань технічного обслуговування відносять:

- попередження прискореного зносу і старіння об'єктів;
- підтримка основних технічних характеристик елементів і систем на заданому рівні;
- продовження міжремонтних термінів експлуатації (подовження ресурсу) технічних об'єктів і систем.

Оснoву технічного обслуговування становлять профілактичні роботи або обслуговування і регламентні перевірки. При цьому профілактичне обслуговування є системою попереджувальних заходів, спрямованих на зниження ймовірності виникнення відмов (технічні огляди, регулювання, заміна комплектуючих елементів, відновлення захисних покриттів, мастила, чистка та т. д.).

Профілактичне обслуговування може бути організовано за принципом:

- регламентного обслуговування;
- календарного обслуговування;
- комбінованого обслуговування

Регламентне обслуговування - обслуговування, яке проводиться після досягнення параметрами технічного об'єкту (системи) деяких регламентованих показників.

Цей вид обслуговування застосовують тоді, коли є відомим зв'язок працездатності об'єкту і показників деяких його технічних параметрів, наприклад, сили струму,

напруги, опору, яскравості і т. д. Ці параметри виробів називаються головними параметрами.

Якщо головний параметр, що визначає працездатність технічного об'єкту (системи) є часом, протягом якого його експлуатують, то профілактичне обслуговування призначається в строго певні календарні періоди.

Рівень надійності нафтогазового обладнання залежить від частоти проведення робіт з профілактичного обслуговування, що передбачає реалізацію комплексу дій, спрямованих на попередження відмов обладнання або на відновлення машин, агрегатів, вузлів і деталей, що відмовили. До обслуговування зазвичай відносять такі операції: складання та розбирання об'єкта; огляд, вимір і випробування деталей та вузлів; очищення та змащування; налагодження та запуск в роботу.

Існують дві стратегії експлуатації обладнання нафтогазової галузі:

- система планово-попереджувальних ремонтів (ППР);
- система обслуговування за фактичним технічним станом (ФТС)

1.3.1 Система планово-попереджувальних ремонтів

У теперішній час для підтримки нафтогазового обладнання в працездатному стані в НАК «Нафтогаз України» використовують ряд технічних заходів, обсяг і періодичність виконання яких нормовані системою планово-попереджувальних ремонтів. З метою контролю поточного і предаварійного стану обладнання прийняті типові регламенти його обслуговування, при яких на весь період експлуатації призначають всі види профілактик і ремонтних робіт, визначають жорсткі терміни їх проведення. Крім того, для кожної профілактики і ремонту встановлюють строгий обсяг (з планованими трудовими і матеріальними витратами) виконуваних робіт на кожному етапі експлуатації обладнання. Для кожного виду обладнання заходи призначають з досвіду експлуатації з урахуванням деякої статистики з відмов. У міру накопичення статистичних даних ці плановані профілактичні роботи мають уточнюватися. Планування ППР передбачає кількість відремонтованих одиниць обладнання в рік. Це призводить до того, що обсяги ремонтних робіт є однаковими для всього обладнання, яке за планом вводять в ППР. Є відомими дані, що в ППР вводяться до 40% газоперекачувальних агрегатів (ГПА) ДК «Укртрансгаз», які в проведенні даних ремонтів в цей час не потребують. Теоретично обгрунтовано [4], що навіть експлуатація до вироблення ресурсу (без ремонтних і профілактичних робіт), до повного руйнування і заміни об'єкта є економічно вигіднішою, ніж експлуатація з ППР. Відзначається, що ППР використовують як вимушену (тимчасову) міру на стадії доведення коштовних об'єктів, призначених для тривалої експлуатації.

Через те, що всі ППР незалежно від вироблення обладнанням повного ресурсу призначають з однаковими обсягами робіт, то в цьому випадку передбачається

здійснення профілактики з повним відновленням технічного стану. На практиці повне відновлення технічного стану нафтогазового обладнання здійснити вдається (імовірно) тільки на початку експлуатації. Однак з плином часу в силу старіння систем, профілактичні роботи, що проводяться, вже не можуть повністю відновити систему і проведення таких ППР є економічно не виправданим. Наприклад, при розгляді витрат на ППР для ГПА ДК «Укртрансгаз», які не потребували у відновлення (обсяг і витрати є тими ж), стає очевидним, що ці витрати до цих пір не враховують в собівартості транспорту газу. Дослідження [3] показали, що ремонти в даному випадку значно погіршують технічний стан і прискорюють старіння агрегату.

Питанням оптимізації профілактичних робіт та ремонтів, надійності відновлювальних робіт присвячено багато досліджень в теорії надійності і масового обслуговування. Аналіз цих робіт показав, що найбільш прогресивною і оптимальною є система обслуговування за фактичним технічним станом (прогнозованим параметром) і майбутнє, безумовно, за цією системою. Впровадження системи обслуговування за ФТС, перш за все, базується на глибоко розвиненій системі діагностування та прогнозування технічного стану обладнання.

1.3.2 Система обслуговування по фактичному технічному стану

Система обслуговування за технічним станом передбачає вибір раціональних (дійсних) співвідношень між обсягом і термінами профілактичних робіт на різних етапах експлуатації обладнання. Для призначення профілактичних робіт використовують не тільки інформацію про стан обладнання в експлуатаційних умовах за останній проміжок часу, але також інформацію про його стани в моменти проведення контрольних перевірок. Працездатність обладнання в процесі експлуатації характеризується ξ_j параметрами (j -число параметрів, яке залежить від глибини діагностування та кількості дефектів, що розпізнають). При $\xi(t) < \xi_{zp}(t)$ агрегат вважають працездатним. На кожному етапі (контрольні перевірки) існує своє початкове значення контрольованого параметра. При досягненні параметром ξ_j певного рівню (рівня зародження дефекту) рекомендовано з цього моменту контролювати стан обладнання з меншим інтервалом. При перетині величини параметра ξ_j гранично допустимого рівня контрольованого параметра предаварійного рівня агрегату необхідно зробити профілактику або ремонт. До цього відбувається виявлення дефектних елементів і причин відхилення параметра від рівня бездефектного агрегату.

Контроль технічного стану обладнання дозволяє планомірно стежити за працездатністю агрегатів і їх елементів, виключає застосування профілактик і ремонтів для агрегатів з допустимим рівнем коефіцієнта технічного стану.

Дослідження показали ефективність застосування даної системи. Знижуються середні питомі витрати на один крок контролю і сумарні витрати на профілактичні роботи. Зменшується число замінених елементів і час простою об'єктів в ремонті. Такий підхід до ремонту за допомогою технічної діагностики допомагає прагнути до технічної і економічної оптимізації з урахуванням індивідуальних властивостей кожного виду обладнання.

Для даного підходу є потрібним створення деяких основних передумов, з яких найбільш важливими є наступні: накопичення досить широкої множини статистичних даних, отриманих під час експлуатації; розробка сукупності методів і засобів для вимірювання та оцінки величин, що характеризують стан обладнання; розробка методик, що дозволяють, на підставі даних вимірювань, визначити технічний стан, що існує в даний момент часу, і попередити його подальший розвиток.

Контрольні питання

1. Що являє собою паливно-енергетичний комплекс?
2. Який показник є основним для характеристики роботи обладнання нафтогазової галузі?
3. Як забезпечують надійність і безпеку обладнання нафтогазової галузі?
4. Назвіть фактори, які впливають на надійність обладнання нафтогазової галузі.
5. Проведіть порівняльний аналіз відомих Вам стратегій технічного обслуговування нафтогазового обладнання в Україні.
6. Яка система обслуговування обладнання є більш прогресивною?
7. Яку систему обслуговування нафтогазового обладнання використовують зараз на державних підприємствах України?

ТЕМА 2: ОСНОВНІ ПРИЧИНИ ВІДМОВ НА ОБ'ЄКТАХ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ

- 2.1 Причини відмов на магістральному трубопровідному транспорті.
- 2.2 Причини відмов на об'єктах нафто газовидобутку.
- 2.3 Причини відмов на нафтоперекачувальних станціях.
- 2.4 Відмови на резервуарах.
- 2.5 Відмови на компресорних станціях.

2.1 Причини відмов на магістральному трубопровідному транспорті

Системи трубопровідного транспорту нафти і газу є досить досконалими. Однак в силу ряду причин на експлуатованих магістральних трубопроводах виникають різного роду дефекти, пошкодження та аварії [7].

Відмови магістральних трубопроводів призводять до повного або часткового припинення перекачування, порушують нормальну роботу промислів та ін., завдають значної шкоди навколишньому середовищу, здатні привести до вибухів і пожеж з трагічними наслідками.

До дефектів і пошкоджень прийнято відносити механічні пошкодження, корозію, ерозію, тріщини і інше, які супроводжуються витокami, що транспортується.

Метал труб при експлуатації магістральних трубопроводів знаходиться під впливом стаціонарного та циклічного навантаження. При цьому він схильний процесам природного і деформаційного старіння. У металі відбувається акумулювання ушкоджень, що може призвести до зміни його механічних властивостей. Виникаючі ситуації відмов на магістральних трубопроводах в основному пов'язані з терміном їх експлуатації. В даний час багато магістральних трубопроводів виробили свій ресурс.

Динамічні навантаження (пульсації тиску, вібрація, гідроудари і т.д.), які відчують трубопроводи в процесі експлуатації, найчастіше проявляються під час роботи нагнітальних установок і при роботі запірної арматури. Крім того, динамічні навантаження можуть випадково виникати при неправильній дії обслуговуючого і технічного персоналу, під час аварійних відключень електроенергії, помилкового включення автоматичного захисту.

Розвиток різних дефектів, пошкоджень призводить до аварій, але тільки в тому випадку, якщо не вжито необхідних заходів для їх запобігання.

Відмова систем магістрального трубопровідного транспорту нафти і газу за період експлуатації може бути викликаний низкою причин, основними з яких є:

- наявність зовнішніх впливів (сил), а також пошкодження при проведенні будівельних робіт (зовнішні впливи можуть пошкодити або перевантажити лінійну частину трубопроводу: вони можуть бути викликані причинами природного характеру та проведенням будівельних робіт);

- вплив середовища, що транспортується. Відмови, викликані дефектами, що виникають під агресивною дією середовища на трубопровід (внутрішня і зовнішня корозія, корозійне розтріскування, водневе охрупчування);

- виробничі дефекти. Відмови, викликані дефектами, які виникають при виготовленні труб, а також при монтажі трубопроводу;

- експлуатаційні помилки. Відступ від діючих нормативів і правил експлуатації систем магістрального транспорту нафти і газу, порушення правил техніки безпеки при різних технологічних операціях, неправильні дії обслуговуючого персоналу;

- протиправні дії (незаконні врізки, тероризм).

Причинами відмов, викликаних порушенням цілісності магістральних трубопроводів, є наступні:

- підвищений рівень вібрації, наявність гранично допустимого перепаду тиску, гідроудар;

- процеси корозії;

- форс-мажор і катастрофічні природні явища.

У меншій мірі на надійність лінійної частини трубопроводу можуть впливати такі фактори, як: наявність комунікацій, які перетинають трубопровід і проходять в одному технічному коридорі; складні умови проходження (вічна мерзлота, скельні ґрунти, болота і ін.); кваліфікація обслуговуючого персоналу; дотримання графіків технічного обслуговування і ремонту та ін.

2.2 Причини відмов на об'єктах нафтогазодобування

Основними причинами відмов на об'єктах нафтогазовидобутку є такі:

- порушення технології виробництва робіт;

- відсутність контролю за виконанням робіт;

- відсутність організаційно-технічних заходів, спрямованих на безпечне ведення робіт;

- установка спецтехніки у вибухонебезпечній зоні;

- порушення вимог відповідних інструкцій з експлуатації обладнання;

- порушення працівниками трудового розпорядку та дисципліни праці;

- порушення вимог відповідних інструкцій і правил по устаткуванню виробничих робочих місць;

- неналежне утримання та обслуговування обладнання.

2.3 Причини відмов на нафтоперекачувальних станціях

Основні причини відмов на нафтоперекачувальних станціях:

для технологічного обладнання:

- вихід з ладу торцевих ущільнень валів;
- відмова маслосистеми;
- розриви прокладок;
- несправність підшипників;
- підвищений рівень вібрації;
- неправильні дії обслуговуючого персоналу і т.д.

для електрообладнання:

- порушення комутації;
- теплові та механічні пошкодження;
- пробій ізоляції і межвиткові замикання;
- деформування обмоток якоря і статора;
- зміна ступеня еластичності ізоляційних витків;
- несправності ізоляторів,
- пробій ізоляції
- обрив провідників, кріплень,
- коротке замикання;
- відмови вимикачів;
- помилкове спрацьовування захисту і т.д .

2.4 Відмови на резервуарах

Справний і працездатний стан резервуарного парку визначається такими основними показниками:

- несучою здатністю,
- герметичністю,
- працездатністю обладнання.

Більшість відмов на резервуарах відбувається через наявність прихованих дефектів, до яких відносять тріщини, пропали, непровари, а також наскрізні дефекти невеликих розмірів, які розвиваються в період експлуатації під дією знакозмінних навантажень (заповнення - спорожнення). Останнє викликано головним чином тим, що циклічний характер навантаження сталевих резервуарів може призводити до втомного руйнування металу, внаслідок цього утворюються тріщини, які є основними причинами відмов і аварійних ситуацій на сталевих резервуарах.

Основні причини відмов на резервуарах:

- старіння металу і його крихке руйнування;

- корозійний знос днища і нижніх поясів стінки резервуара;
- дефекти зварних з'єднань і спотворення форми стінки через низьку якість монтажу або неправильно виконаної основи;
- нерівномірні осідання і локальні просідання основи;
- проектувальні помилки і недоліки;
- помилки при виконанні будівельно-монтажних робіт;
- форс-мажорні обставини.

2.5 Відмови на компресорних станціях

До основних факторів, що впливають на можливість виникнення відмов на компресорних станціях (КС), відносять:

- велику кількість елементів, які ускладнюють будівельно-монтажні роботи, а значить, є місцями погіршення якості контролю. До таких можна віднести з'єднання, перехідники, арматуру та інше;
- наявність переходів газопроводу з підземної частини в надземну. Це обумовлює додаткові напруги в тілі труб і викликає посилену корозійну активність;
- складна схема прокладки газопроводів і обв'язки газоперекачувальних агрегатів також викликає додаткові навантаження;

Основні причини відмов на КС магістральних газопроводів:

- перерва в електропостачанні;
- відключення системи маслопостачання;
- руйнування механічної частини;
- відмови КВП і А;
- порушення правил технічної експлуатації;
- відключення станційних систем (системи управління і телемеханіки).

Встановлено, що основними причинами і факторами, що сприяють їх виникненню, є:

- підвищений рівень вібрації трубопроводів,
- просадка трубопроводу і його опор;
- дефекти виготовлення фасонних частин і арматури;
- порушення технології будівельно-монтажних робіт;
- корозійний знос.

Прямими «винуватцями» руйнувань компресорних установок можуть бути: перегрів елементів компресорної установки, через підвищення робочої температури стисненого повітря; перевищення вмісту пилу і вологи в повітрі; статична електрика; неконтрольоване підвищення тиску повітря; невідповідність монтажу проектними даними; неякісне обслуговування компресорної установки.

Контрольні питання

1. Якими є наслідки відмов магістральних трубопроводів?
2. Наведіть приклади динамічних навантажень трубопроводів.
3. Який вплив на трубопроводи здійснюють динамічні навантаження?
4. Якими є основні причини відмов систем магістрального трубопровідного транспорту нафти і газу?
5. Якими є основні причини відмов на об'єктах нафтогазодобування?
6. Якими є основні причини відмов на нафтоперекачувальних станціях?
7. Якими є основні причини відмов на резервуарах?
8. Якими є основні причини відмов на компресорних станціях?

ТЕМА 3: ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ

3.1 Мета і основні завдання теорії надійності.

3.2 Надійність технічного об'єкту.

Забезпечення надійності технічних засобів є однією з основних задач і «вічних» проблем науки і техніки. Оскільки ненадійні вироби (починаючи від кам'яної сокири) ніколи і нікому не були потрібні, то проблемам надійності приділялась увага протягом усіх періодів розвитку техніки. Однак особливого значення проблеми надійності технічних засобів набули в другій половині ХХ століття.

Особливої актуальності ця проблема набула для нафтогазової галузі. Поняття надійності напругу пов'язано з безпекою, яка є однією із важливих умов роботи та формування високих кінцевих результатів виробничої діяльності підприємств по здобутку, транспортуванню, переробки та зберігання вуглеводнів.

У багатьох випадках низька надійність приводить до того, що вартість експлуатації обладнання протягом року в кілька разів перевищує вартість самого обладнання, що є неприпустимим для нафтогазової галузі.

Визначення показників надійності нафтогазового обладнання та забезпечення їх необхідного рівня ускладнюються такими особливостями:

- у всіх закономірностях теорії надійності бере участь фактор часу;
- фізичні закономірності, що визначають зміни характеристик об'єктів, є складними і різноманітними;
- процеси зміни параметрів технологічного обладнання є випадковими;
- всі стадії створення і експлуатації об'єкта вносять свій внесок у формування показників надійності.

Особливістю проблеми надійності в нафтогазовій галузі є її зв'язок з усіма етапами проектування, виготовлення і експлуатації об'єкта, починаючи з моменту формування та обґрунтування ідеї його створення і закінчуючи прийняттям рішення про списання.

При проектуванні і розрахунку об'єкта нафтогазової галузі закладається його надійність. Вона залежить від конструкції об'єкта і його вузлів, застосовуваних матеріалів, методів захисту від шкідливих впливів, пристосованості до ремонту і обслуговування та інших конструктивних особливостей.

При виготовленні об'єкта його надійність забезпечується. Вона залежить від якості виготовлених деталей, методів контролю продукції, що випускається, можливостей управління ходом технологічного процесу, від якості збірки об'єкта і його

вузлів, методів випробування готової продукції та інших показників технологічного процесу.

При експлуатації об'єкта його надійність реалізується. Вона залежить від методів і умов експлуатації об'єкта, прийнятої системи його технічного обслуговування і ремонту, режимів роботи та інших експлуатаційних факторів.

3.1 Мета і основні завдання теорії надійності

Питаннями надійності технічних систем займається теорія надійності, як наука вона являє собою наукову базу для створення системи управління надійністю технічних об'єктів.

При цьому ціллю теорії надійності є зменшення ймовірності виникнення відмов виробів і конструкцій, а також їх наслідків.

Теорія надійності, як і будь-яка прикладна теорія, базується на фундаментальних математичних і природничих науках.

Базу теорії надійності складають:

- математичні методи теорії надійності, що базуються в основному на теорії ймовірностей і математичної статистики, методи оптимізації, теорії інформації і математичної логіки та ін.;

- теорія ушкоджувальних процесів (фізика відмов), що вивчає незворотні процеси, що призводять до втрати при експлуатації об'єктів початкових властивостей матеріалами, з яких виготовлені об'єкти, або які необхідні для їх функціонування (паливо, мастильні матеріали і т.п.), перш за все - триботехнічні процеси, втому, корозію, ерозію і старіння;

- прикладні методи забезпечення надійності в областях розрахунку і прогнозування, проектування, технології виготовлення, експлуатації та ремонту об'єктів досліджуваного типу.

Предметом теорії надійності є встановлення кількісних закономірностей виникнення відмов техніки і технологічних споруд і способи їх зниження.

Основні задачі теорії надійності:

- обґрунтування кількісних характеристик - показників надійності;
- побудова моделей, що дозволяють обчислити ці показники для складних систем за інформацією про її елементи;
- розробка технологічних схем, параметрів систем і конструкцій, що забезпечують оптимальне поєднання надійності, ефективності та якості;
- розробка рекомендацій, спрямованих на раціональний вибір засобів, що забезпечують надійність при проектуванні технічних систем і техногенних об'єктів;

- розробка методів і засобів визначення технічного стану технічних об'єктів, а також розробка додаткових керівних документів щодо використання засобів і методів діагностування;
- визначення методів цілеспрямованого впливу на надійність експлуатованих установок і технічних споруд шляхом впровадження організаційних і технологічних заходів для їх ремонту та профілактичного обслуговування;
- розробка процедур отримання первинної інформації про надійність, за допомогою випробувань на надійність, з подальшою і обробкою цих результатів;
- розробка рекомендацій для резервування систем, вибору раціональної кількості запасних частин і т.д.;
- розробка методів контролю надійності при прийманні виробів і конструкцій.

3.2 Надійність технічного об'єкту

Відповідно до державного стандарту України ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення» **надійність** є властивістю об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

Надійність є комплексною властивістю, що залежно від призначення об'єкта і умов його застосування, може містити в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збереженість чи певні поєднання цих властивостей. Наведений термін використовують лише для загального не кількісного опису вказаних властивостей.

Теорія надійності спирається на сукупність різних понять, визначень, термінів і показників, які строго регламентовані в державних стандартах. Всі терміни і визначення даються стосовно технічних об'єктів цільового призначення, що розглядаються в періоди проектування, виробництва, експлуатації і випробування на надійність.

Введемо деякі терміни і поняття, використовувані в теорії надійності.

Об'єкт – це система, споруда, машина, підсистема, апаратура, функціональна одиниця, пристрій, елемент чи будь яка їх частина, що розглядається з погляду надійності як самостійна одиниця. Сукупність об'єктів, об'єднаних спільним призначенням і метою функціонування, може також розглядатися як об'єкт.

Система - це технічний об'єкт, призначений для виконання певних функцій.

Окремі частини системи (як правило, які є конструктивно відособленими) називають **елементами**.

Проте необхідно відмітити, що один і той же об'єкт залежно від того завдання, яке хоче вирішити конструктор (дослідник, проектувальник, розробник), може розглядатися як система або як елемент. Наприклад, газоперекачувальний агрегат зазвичай розглядають як систему. Проте він може стати елементом крупнішого об'єкту –

компресорної станції, яку у свою чергу розглядають, як систему. Отже, можна дати ще одне повніше визначення елементу.

Елемент є нерозкладним (у даній системі) компонентом складних тіл, матеріальних систем, теоретичних побудов; будь-яким об'єктом, пов'язаним певними відношеннями з іншими об'єктами в єдиний комплекс. Зв'язок елементів системи позначають терміном «структура».

Елемент - це об'єкт, що є складовою частиною системи (яка складається у свою чергу з інших частин), окремі частини якої не представляють самостійного інтересу в рамках конкретного розгляду.

Функція (об'єкта) - виконання в об'єкті процесу, що відповідає його призначенню, виявлення заданої умови чи властивості об'єкта відповідно вимогам нормативної та (чи) конструкторської (проектної) документації.

Основна функція – функція чи сукупність функцій об'єкта, виконання якої розглядають як необхідну умову відповідності об'єкта його призначенню. Всі функції об'єкта можна умовно розподілити на основні та допоміжні.

Допоміжні функції — функції, невиконання яких не порушує відповідності об'єкта його призначенню.

При проектуванні система (пристрій) повинна задовольняти всім технічним вимогам. Ці вимоги можна розділити на:

- **основні:** такі, що забезпечують виконання заданих функцій;
- **допоміжні:** такі, що пов'язані із зручністю експлуатації, зовнішнім виглядом і т.д.

Відповідно до цього всі елементи системи ділять на основні і допоміжні. Допоміжні елементи не пов'язані безпосередньо з виконанням заданих функцій системи і не впливають на виникнення відмови.

При побудові логічної структури технічної системи (ТС), призначеної для дослідження надійності, для спрощення розрахунків має сенс приймати до уваги тільки основні елементи.

З точки зору теорії надійності будь-який технічний об'єкт (система, пристрій, елемент) можна охарактеризувати його властивостями, технічним станом і пристосованістю до відновлення після втрати працездатності (рис. 3.1). При цьому найважливішою комплексною властивістю ТС є його надійність.

Безвідмовність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу або деякого наробітку (напрацювання).

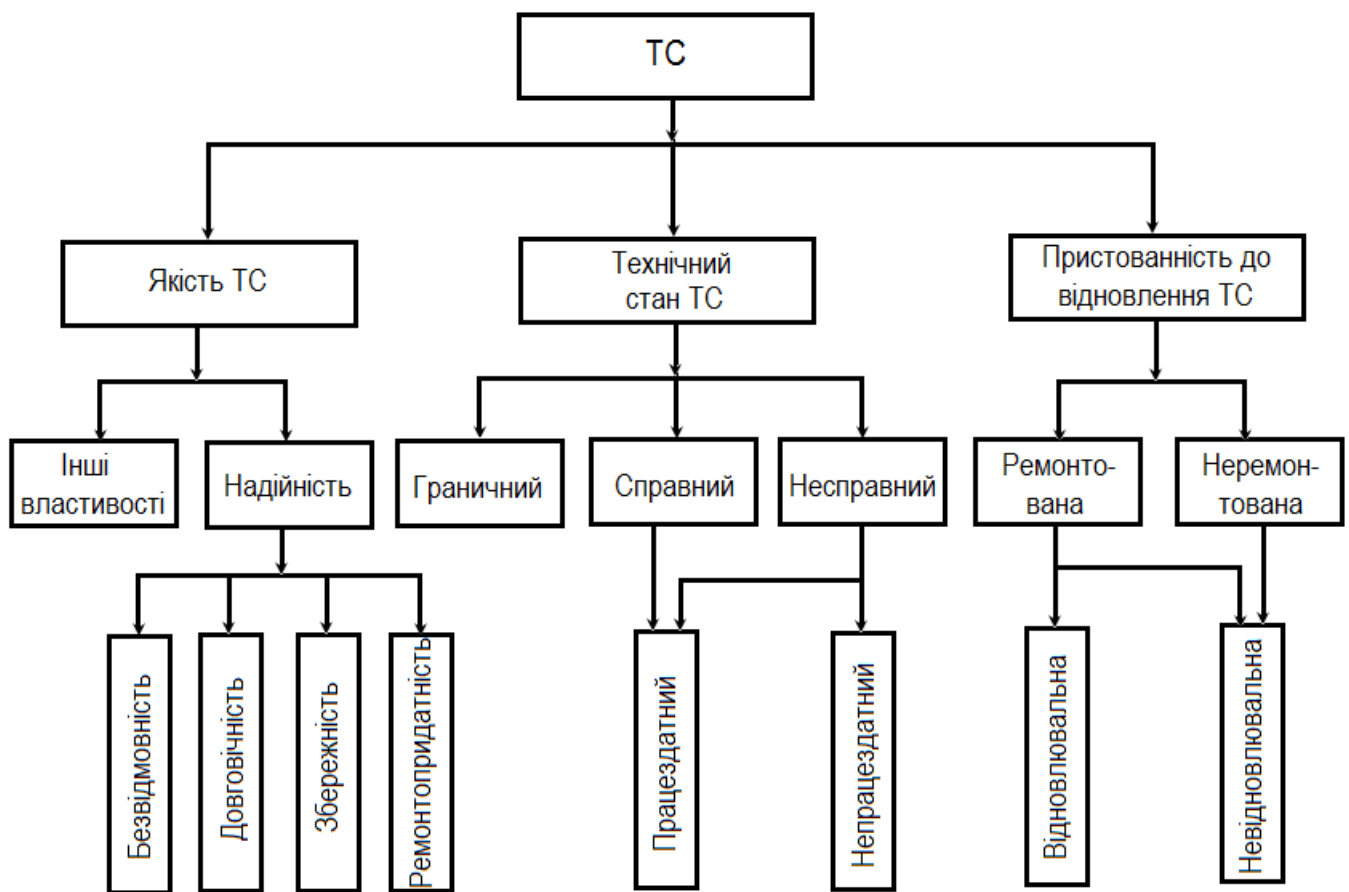


Рисунок 3.1 – Властивості ТС

Напрацювання – тривалість чи обсяг роботи об'єкту, може бути як неперервною величиною (тривалість роботи в годинах, кілометрах пробігу тощо), так і цілочисельною величиною (кількість робочих циклів, запусків тощо).

Довговічність – властивість зберігати працездатність (виконувати потрібні функції) до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонтів.

Граничний стан – стан об'єкта, за яким його подальша експлуатація є неприпустимою чи недоцільною, або відновлення його працездатного стану є неможливим чи недоцільним.

За критерій граничного стану приймають ознаку або сукупність ознак граничного стану об'єкта, встановлені нормативно-технічною і (або) конструкторською (проектною) документацією. Залежно від умов експлуатації для одного і того ж об'єкта можуть бути встановлені два і більше критерію граничного стану.

Збереженість - це властивість ТС безперервно зберігати справний і працездатний стан після періоду зберігання і транспортування. Збереженість характеризується здатністю об'єкту протистояти негативному впливу умов зберігання і транспортування на його безвідмовність і довговічність. Тривале зберігання і транспортування

об'єктів можуть понизити їх надійність при подальшій роботі в порівнянні з об'єктами, які не піддаються зберіганню і транспортуванню.

Ремонтопридатністю називається властивість об'єкту, що полягає в пристосованості до попередження і виявлення причин виникнення відмов, пошкоджень і усуненню їх наслідків шляхом проведення ремонту і технічного обслуговування. Дана властивість є дуже важливою, оскільки характеризує ступінь стандартизації і уніфікації елементів ТС, зручність їх розміщення з погляду доступності для контролю і ремонту, пристосовність до регулювальних операцій і т.д.

Контрольні питання

1. Якими особливостями ускладнюється визначення показників надійності нафтогазового обладнання та забезпечення їх необхідного рівня?
2. Якою є особливість проблеми надійності в нафтогазовій галузі?
3. На якому етапі закладається надійність об'єкта нафтогазової галузі?
4. На якому етапі забезпечується надійність об'єкта нафтогазової галузі?
5. Назвіть мету і основні завдання теорії надійності.
6. Поясніть властивості технічної системи.
7. Дайте визначення безвідмовності об'єкту.

ТЕМА 4: ТЕХНІЧНИЙ СТАН ОБ'ЄКТУ, ЙОГО ВИДИ ТА ЗМІНИ

- 4.1 Технічний стан. Види технічного стану.
- 4.2 Властивості технічного стану.
- 4.3 Події зміни технічного стану об'єктів.
- 4.4 Технічний ресурс обладнання.
- 4.5 Фізична сутність надійності.

4.1 Технічний стан. Види технічного стану

Технічний стан об'єкту — стан, який характеризує об'єкт в певний момент часу, за певних умов зовнішнього середовища значеннями параметрів, установлених технічною документацією на об'єкт.

Технічний стан ТС в даний момент часу характеризують справністю або несправністю, працездатністю або непрацездатністю, а також граничним станом.

Обслуговуваний об'єкт – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування передбачено нормативно-технічною документацією та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

Необслуговуваний об'єкт – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування не передбачено нормативно-технічною документацією та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

Справним станом (справністю) ТС називають такий її стан, при якому він відповідає всім вимогам, встановленим нормативно-технічною документацією (НТД). Якщо ТС не відповідає хоч би одній з цих вимог, то вона знаходиться у *несправному* стані.

Якщо ТС знаходиться у стані, при якому вона здатна виконати задані функції, зберігаючи значення заданих параметрів в межах, встановлених нормативно-технічною документацією (НТД), то вона знаходиться в *працездатному стані*.

Непрацездатним станом ТС називається стан, при якому значення хоч би одного заданого параметра, що характеризує її здатність виконувати задані функції, не відповідає встановленим вимогам НТД.

Поняття *несправності* є ширшим за поняття працездатності. Несправна ТС може бути працездатною і непрацездатною – все залежить від того, якій вимозі НТД не задовольняє дана ТС. *Так, наприклад, якщо у обладнання кожух є погнутим, його лакофарбове покриття порушено, пошкоджено ізоляцію провідників, проте параметри апаратури знаходяться в межах норми, то ТС вважають несправною, але в той же час працездатною.* Справна ТС завжди є працездатною.

При тривалій експлуатації ТС може досягти *граничного стану*, при якому її подальша експлуатація має бути припинена через неможливість усунення порушення вимог безпеки при відході заданих параметрів за встановлені межі, або неможливість уникнення зниження ефективності експлуатації нижче допустимої, або необхідності проведення середнього або капітального ремонту. Виходячи з можливості подальшого використання після відмови і пристосованості до відновлення, всі ТС можна класифікувати таким чином (рис. 4.1).

Відновлюваною ТС називають систему, яка після відмови та усунення несправності знову стає здатною виконувати потрібні функції з заданими кількісними показниками надійності, тобто працездатність такої ТС у разі виникнення відмови підлягає відновленню в даній ситуації. Якщо ж в даній ситуації відновлення працездатності даної ТС при її відмові з будь-яких причин визнають недоцільним або нездійсненним, то систему називають *невідновлюваною*.

Невідновлювана ТС – система, ремонт якої є неможливим або він не дозволяє відновити працездатність із заданими кількісними показниками надійності.

Невідновлюваний об'єкт (система) може бути як ремонтним так і неремонтним.

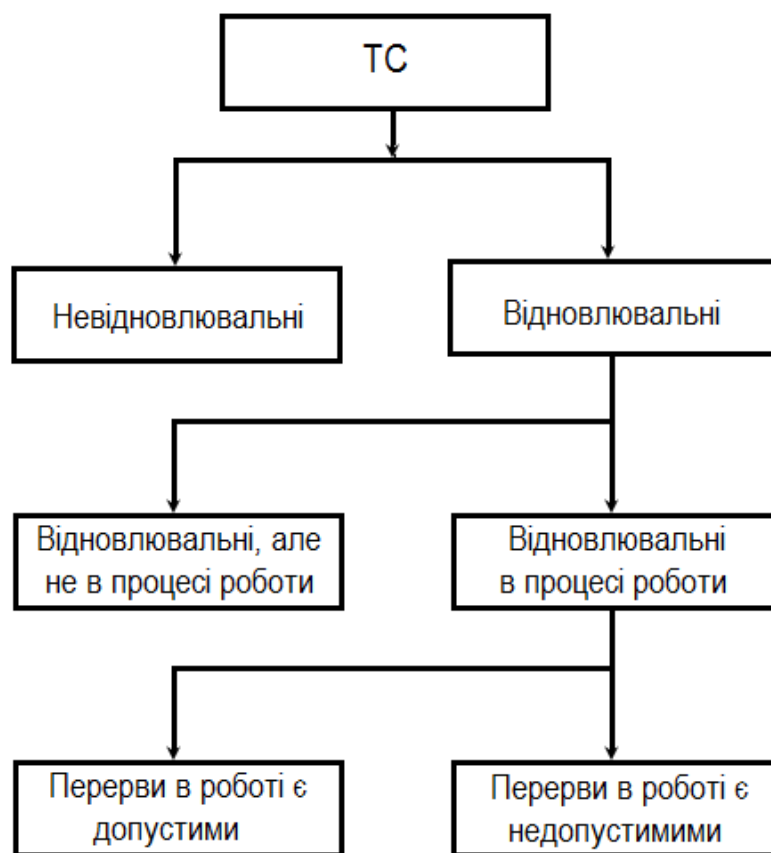


Рисунок 4.1 – Класифікація об'єктів ТС

Ремонтовною (ремонтпридатною) ТС називають систему, ремонт якої є можливим та передбачений нормативною, ремонтною та (чи) конструкторською (проектною) документацією, тобто несправність або працездатність такої системи у разі виникнення відмови або пошкодження підлягає відновленню. Інакше, об'єкт (систему) називають **неремонтованим** (простим прикладом неремонтованого об'єкту служать електролампочки).

Неремонтовний (не ремонтпридатний) об'єкт – об'єкт, ремонт якого є неможливим чи непередбаченим нормативною, ремонтною та (чи) конструкторською (проектною) документацією. Такий об'єкт завжди є і невідновлюваним (наприклад, резистор, конденсатор, і т.п.). В той же час, ремонтований пристрій може бути як відновлюваним, так і невідновлюваним - все залежить від існуючої системи технічного обслуговування і ремонту, конкретної ситуації у момент відмови. Наприклад, в умові експлуатації телевізорів, кінескоп що відмовив є виробом не відновлюваним; але на ремонтному заводі - вже відновлюваним; силовий трансформатор, що відмовив, може опинитися в руках радіоаматора відновлюваним елементом, якщо є відсутнім запасний трансформатор.

Загальним поняттям є поняття ремонтпридатності. **Ремонтпридатність** - властивість об'єкту, що полягає в пристосованості до виконання його ремонту і техобслуговування.

На практиці часто бувають такі ситуації, в яких потрібно, щоб пристрій, знаходячись в режимі очікування, і, потім, почавши працювати в довільний момент часу, пропрацював би безвідмовно протягом необхідного проміжку часу. Стан працездатності пристрою в довільно вибраний момент часу називається **готовністю**. Якщо при цьому працездатність пристрою зберігатиметься протягом заданого інтервалу часу, то тоді забезпечується так звана **оперативна готовність пристрою**.

До факторів, під впливом яких змінюється технічний стан об'єкта, можна віднести дії кліматичних умов, старіння з часом, операції регулювання і налагодження в ході виготовлення або ремонту, заміну елементів, що вийшли з ладу і т.п.

4.2 Властивості технічного стану

Для інженерних цілей зручно оперувати показниками, які є похідними, пов'язаними між собою і входять в поняття «надійність». Схематично названі вище поняття представлені на рис. 4.2.

Технічний ресурс – граничний сумарний час безперервної експлуатації технічного об'єкта або граничний обсяг роботи, яку він здатний виконати. Після досягнення межі подальша експлуатація об'єкта має бути припинена.

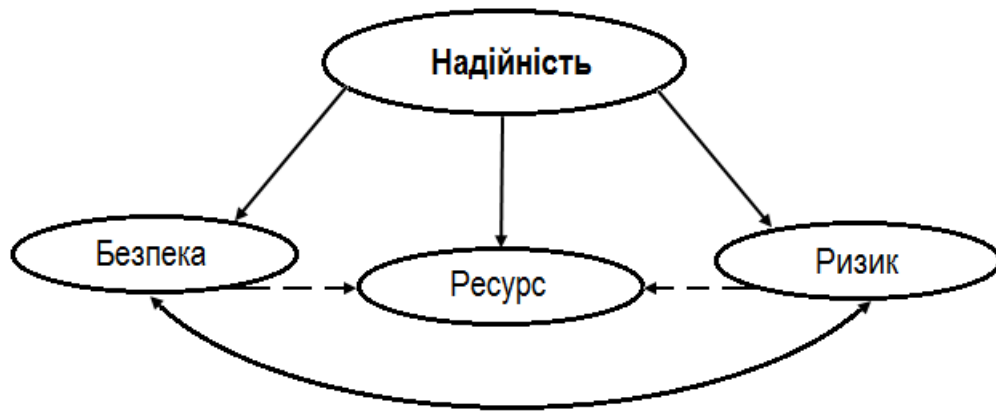


Рисунок 4.2 – Взаємозв'язок надійності і похідних технічних показників

Розрізняють нормативний ресурс і нормативний термін служби, які визначаються на етапі розробки проектного завдання з урахуванням сучасного технічного стану, світового рівня і темпів науково-технічного прогресу в даній галузі.

На стадії експлуатації оперують поняттями залишкового ресурсу або залишкового терміну служби, які є індивідуальними характеристиками технічних об'єктів.

Термін служби – календарна тривалість експлуатації об'єкта до його переходу в граничний стан, яка вимірюється в одиницях часу.

Призначений термін служби – календарна тривалість експлуатації, при досягненні якої експлуатацію об'єкта належить припинити незалежно від його технічного стану.

Безпека - властивість об'єкта при виготовленні і експлуатації і в разі порушення працездатного стану не створювати загрозу для життя і здоров'я людей, а також для навколишнього середовища. Безпека характеризує надійність об'єкта по відношенню до життя і здоров'ю людей, стану довкілля; при цьому безпеку дає обмеження на значення ресурсу.

Ризик є пов'язаним з безпекою, і функція ризику є доповненням функції безпеки до одиниці.

З наведених понять визначальним є поняття технічного стану об'єкта, а саме, його граничне значення.

4.3 Події зміни технічного стану об'єктів

Подіями зміни технічних станів об'єктів є: пошкодження, відмова, вичерпання ресурсу, відновлення і ремонт (рис.4.3).

Пошкодження - подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкта, при збереженні його працездатності.

Відмова - подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкта.

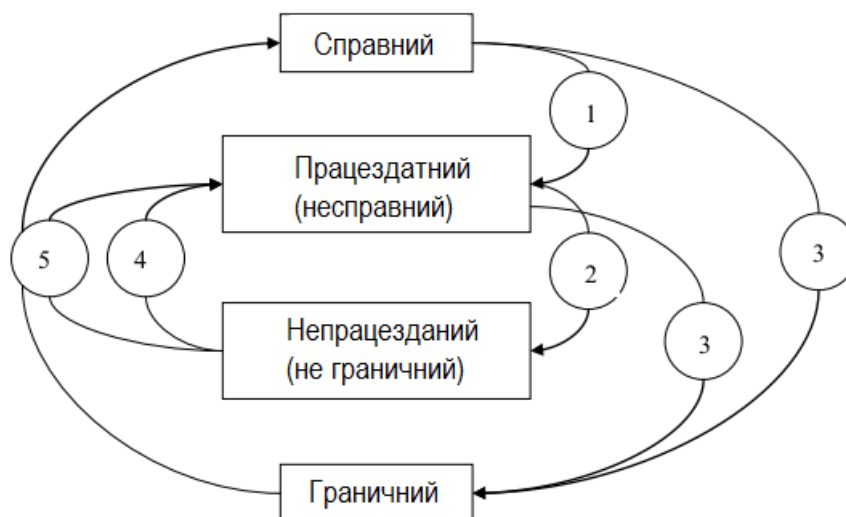


Рисунок 4.3 – Події зміни технічного стану об'єктів

Час виникнення відмови і час роботи об'єкта між відмовами є випадковими величинами. Це пояснюється випадковими змінами умов експлуатації об'єкта та іншими чинниками. Водночас, необхідність підналагоджування агрегатів або обладнання, яка регламентована умовами експлуатації й обслуговування і пов'язана з недостатньою якістю самої обладнання, не слід вважати відмовою.

Вичерпання ресурсу - перехід об'єкта в граничний стан.

Відновлення - перехід об'єкта з несправного стану в справний.

Ремонт - комплекс операцій з відновлення працездатного або справного стану ресурсу об'єкта в цілому.

4.4 Технічний ресурс обладнання та його подовження

Розглянемо складові технічного ресурсу обладнання, рис. 4.4.

Повний технічний ресурс обладнання є сумарним наробітком об'єкта за час його експлуатації.

Наробіток (напрацювання) – тривалість чи обсяг роботи об'єкту. Наробіток може бути як неперервною величиною (тривалість роботи в годинах, кілометрах пробігу тощо), так і цілочисельною величиною (кількість робочих циклів, запусків тощо).

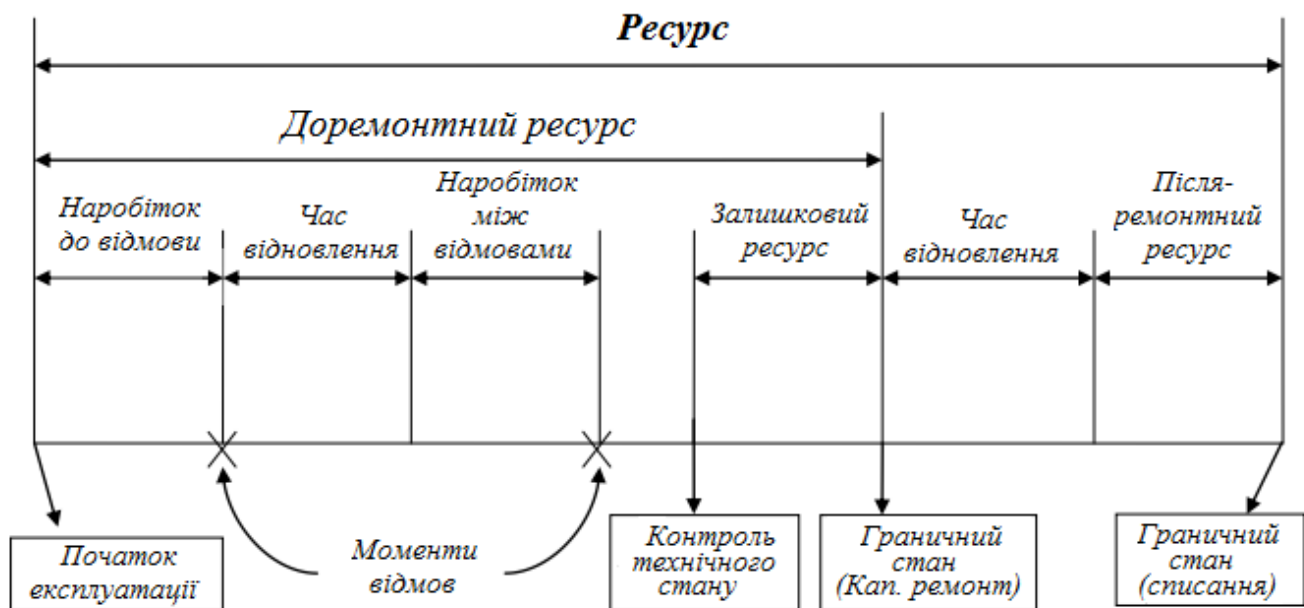


Рисунок 4.4 – Технічний ресурс обладнання

Відмовою є подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію.

Наробіток до відмови – наробіток об'єкта від початку експлуатації до виникнення першої відмови.

Наробіток між відмовами – наробіток об'єкта від завершення відновлення його працездатного стану після відмови до виникнення наступної відмови.

Залишковий ресурс – сумарний наробіток об'єкта від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан. Аналогічно запроваджуються поняття залишкового наробітку до відмови, залишкового терміну служби та залишкового терміну зберігання.

Призначений ресурс – сумарний наробіток, при досягненні якого експлуатацію об'єкта належить припинити незалежно від його технічного стану.

Тривалість відновлення – інтервал часу, протягом якого об'єкт перебуває в непрацездатному стані через відмову.

Тривалість технічного обслуговування [ремонту] – інтервал часу, протягом якого виконують вручну чи автоматично операцію технічного обслуговування та (чи) ремонту об'єкта, включно з тривалістю затримок через незабезпеченість матеріальними ресурсами.

Трудомісткість технічного обслуговування [ремонту] – сумарна тривалість індивідуальних операцій технічного обслуговування та (чи) ремонту об'єкта, подана в годинах та затрачена всім обслуговуючим персоналом для цього виду операцій

технічного обслуговування та (чи) ремонту в інтервалі визначеного часу. Трудомісткість вимірюють у людино-годинах.

Період припрацювання – можливий початковий період наробітку об'єкта, протягом якого спостерігають сталу тенденцію до зменшення параметра потоку відмов, який зумовлений наявністю, поступовим виявленням та усуненням прихованих дефектів.

Період сталого параметру потоку відмов – період терміну служби відновлюваного об'єкта з приблизно сталим параметром потоку відмов. Період постійності параметру потоку відмов відновлюваного об'єкта системи настає, коли в об'єкті будуть замінені хоч один раз практично всі складові елементи на аналогічні (нові).

Подовженням ресурсу технічного об'єкту (системи) є продовження терміну експлуатації технічних пристроїв та обладнання. Результатом роботи по подовженню ресурсу обладнання нафтогазової галузі є висновок експертизи промислової безпеки встановленого зразку, складений, оформлений та підписаний експертом з промислової безпеки.

За результатами робіт по визначенню можливості продовження терміну безпечної експлуатації обладнання експерт приймає одне з рішень:

- продовження експлуатації на встановлених параметрах;
- продовження експлуатації з обмеженням параметрів;
- ремонт;
- доробка (реконструкція);
- використання за іншим призначенням;
- виведення з експлуатації.

Роботи по визначенню можливості продовження терміну безпечної експлуатації технічних об'єктів нафтогазової галузі: пристроїв та обладнання проводяться організацією, яка не експлуатує ці небезпечні виробничі об'єкти:

- після досягнення нормативного (розрахункового) терміну експлуатації технічного пристрою, устаткування;
- за приписом органу виконавчої влади, уповноваженого на здійснення контролю та нагляду у сфері промислової безпеки, висунутій в установленому порядку.

Роботи з подовження ресурсу технічних об'єктів: пристроїв та обладнання планують і проводять таким чином, щоб відповідне рішення було прийнято до закінчення нормативного (розрахункового) терміну експлуатації; при необхідності їх проводять поетапно на складових частинах технічних об'єктів (систем), які за технічною документацією можна оцінити як індивідуальні одиниці, що мають призначений технічний ресурс.

4.5 Фізична сутність надійності

При вивченні закономірностей відмов найцікавішим є визначення місця виникнення відмови і проміжків часу відновлення та роботи об'єкта між відмовами. Випадковий характер процесів дає змогу стверджувати, що математичним апаратом теорії надійності є теорія ймовірностей і математична статистика. Проте слід мати на увазі, що теорія надійності є самостійною наукою, а не окремим розділом теорії ймовірностей. Вона є технічною, а не математичною дисципліною, а коло задач, які вона розв'язує, не обмежується задачами теорії ймовірностей.

Методи теорії ймовірностей дають можливість досліджувати закономірності відмов як масових випадкових явищ. Вони не дають змоги передбачити час і місце виникнення певної відмови (наприклад, першої). Тому зазвичай розглядають надійність цілого класу однотипних об'єктів, а не одного конкретного зразка. Проте це не означає, що не можна за допомогою ймовірнісних методів визначити надійність конкретного зразка. Спостерігаючи за потоком відмов під час тривалої експлуатації певного зразка, можна дійти висновку про його надійність, а також про надійність цілого класу однотипних об'єктів.

Відмові завжди передують складні внутрішні зміни в системі. Вони можуть проявлятися по-різному, залежно від типу об'єкта, місця та характеру відмови. В одній технічній системі зростає спожита потужність, збільшуються внутрішні витрати, зменшується коефіцієнт корисної дії (ККД) тощо, а в іншій – спостерігається дестабілізація характеристик, з'являються непередбачені зміни вихідних параметрів. Спостерігаючи за цими змінами, можна в кожний момент часу визначити запас надійності системи, передбачити появу відмови, своєчасно її ліквідувати або не допустити. Ці проблеми розв'язує теорія діагностування – наука, що досліджує технічні стани та форми їх виявлення в об'єктах, розробляє методи оцінювання технічних станів, принципи побудови і застосування систем діагностування. Кінцевою метою діагностування є зниження витрат на технічне обслуговування і ремонт, забезпечення встановленого рівня безвідмовності й максимальної продуктивності об'єктів у процесі експлуатації. Отже, *технічне діагностування є засобом підвищення надійності технічних об'єктів.*

Основними чинниками, які впливають на надійність і довговічність технічних об'єктів, є конструктивні, виробничо-технологічні та експлуатаційно-технічні.

Конструктивні чинники полягають у структурній побудові системи; конструктивному виконанні окремих елементів і системи в цілому; ступені відповідності конструктивних і схемних рішень реальним умовам функціонування; ступені пристосованості складових об'єкта до відновлення працездатності після відмови.

Виробничо-технологічні чинники передбачають реалізацію прогресивних технологічних процесів; використання сучасного обладнання; виконання вимог технічної

документації; забезпечення стабільності якості виробів.

Експлуатаційно-технічні чинники, що впливають на надійність, залежать від умов роботи та зовнішніх навантажень на систему, сукупності ремонтно-профілактичних заходів, оскільки стан системи залежить від стану комплектуючих її елементів.

Відмова елемента – явище випадкове, проте поява будь-якої відмови спричинена дефектами вихідних матеріалів; процесами старіння; зовнішніми навантаженнями; конструктивно-технологічними дефектами; експлуатаційним режимом.

Контрольні питання

1. Що називають технічним станом об'єкту?
2. Який стан ТС вважають справним?
3. В якому разі вважають, що ТС знаходиться у працездатному стану?
4. Який стан ТС називають непрацездатним?
5. Чи завжди справна ТС є працездатною?
6. Який стан ТС є граничним?
7. Дайте визначення ремонтпридатності об'єкту.
8. Що називають технічним ресурсом технічного об'єкту?
9. Поясніть, які події відбуваються при зміні технічного стану об'єктів.
10. Дайте характеристику складових технічного ресурсу обладнання.
11. Що є результатом робіт по подовженню ресурсу обладнання?
12. Яке рішення може прийняти експерт за результатами робіт по визначенню можливості продовження терміну безпечної експлуатації обладнання?

ТЕМА 5: ВІДМОВИ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ. ПОКАЗНИКИ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ

5.1 Відмови технічних об'єктів.

5.2 Показники безвідмовної роботи

5.1 Процеси, які призводять до відмов об'єктів

Відмови відповідно до фізичної природи їх виникнення пов'язані з руйнуванням деталей або їхніх поверхонь (поломка, спрацювання, корозія), втратою елементами виробів певних властивостей або параметрів (теплопровідності в теплових апаратах, електричного опору або електропровідності, магнітних властивостей та ін.) і зумовлюються різними процесами, що відбуваються в обладнанні під час експлуатації або збереження.

За швидкістю проходження процеси, які призводять до відмов виробів, поділяють на швидкобіжні, середньої швидкості й повільні.

Швидкобіжні процеси мають періодичність, що вимірюється частками секунди. Вони діють у межах циклу роботи технічного об'єкта (його елемента) і при наступних циклах виникають знову. До них належать вібрація вузлів, зміна навантаження і сил тертя залежно від взаємного розташування деталей та вузлів машини чи апарата під час роботи.

Процеси середньої швидкості пов'язані з періодом безперервної роботи об'єкту (елемента). Їхня тривалість вимірюється хвилинами, годинами. Вони приводять до поступової зміни параметрів або властивостей об'єкту. До цієї категорії належать оборотні (нагрівання в період пуску й охолодження при зупинці) та необоротні (спрацювання інструменту) процеси.

Повільні процеси проходять під час роботи виробу між періодичними оглядами або ремонтами за період повного спрацювання. Їхня тривалість оцінюється днями, місяцями, роками. Такими процесами є: спрацювання основних механізмів об'єкту, перерозподіл внутрішніх напружень, повзучість металів, корозія, сезонні зміни температури (зима, літо), старіння. Ці процеси також впливають на технічні параметри об'єктів, але приводять до дуже повільної їх зміни. Проявлення дії повільних процесів упереджують за рахунок ремонтів і профілактичних заходів, які виконують через певні проміжки часу.

Процеси, що відбуваються в об'єктах під час експлуатації і збереження, та їхні відмови перебувають у причинно-наслідковому зв'язку. Причини відмов мають випадковий і систематичний характер.

Причини *випадкового* характеру: непередбачені перевантаження, дефекти матеріалів або похибки виготовлення елементів об'єкта, не виявлені контролем, збої системи керування або помилки експлуатуючого персоналу.

Причини *систематичного* характеру проявляються у результаті дії чинників із закономірними наслідками: спрацювання деталей, корозія і накипання поверхонь теплопровідних елементів апаратів, забруднення фільтрів тощо. Систематичні причини відмов краще піддаються прогнозуванню.

5.2 Відмови технічних об'єктів

Як вже було сказано, відмовою є подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто у порушенні працездатного стану об'єкта. «Відмова» є подією, на відміну від «несправності», яка є станом та причиною відмови. Видами відмови вважають форми її прояви.

Відмови технічних об'єктів класифікують за такими ознаками:

- за спроможністю виконання функцій;
- за характером прояву (виникнення);
- за трудомісткістю усунення;
- за причинами виникнення;
- за впливом на стан;
- за характером виникнення і можливістю прогнозування;
- за залежністю;
- за характером виявлення;
- за наслідками - критичні і некритичні (істотні і несуттєві).

Обставини під час проектування, виробництва чи використання об'єкта, які привели до відмови називають причиною відмови. Критерієм відмови є ознака чи сукупність ознак порушення працездатного стану об'єкта, встановлені у нормативній та (або) конструкторській (проектній) документації.

Наслідками відмови є явища, процеси, події та стани, які зумовлені виникненням відмови об'єкта.

Збій – самоусувна відмова або одноразова відмова, яку незначним втручанням усуває оператор.

Ресурсна відмова – відмова, внаслідок якої об'єкт досягає граничного стану.

5.2.1 Відмови технічних об'єктів за спроможністю виконання функцій

За спроможністю виконання функцій (подальшого використання об'єкту) розрізняють часткові та повні відмови.

Часткова відмова – відмова, що призводить до неспроможності об'єкта виконувати частину з потрібних функцій.

Повна відмова – відмова, що призводить до повної неспроможності об'єкта виконувати жодну з потрібних функцій.

Повні відмови унеможливають застосування об'єкту за призначенням до їх усунення, а при часткових відмовах об'єкт можна використовувати частково, наприклад з певною потужністю чи продуктивністю або з недостатньою точністю (для вимірювальних приладів).

5.2.2 Відмови технічних об'єктів за характером прояву

За характером прояву виділяють раптові і поступові відмови.

Раптова відмова – відмова, яку неможливо передбачити попередніми дослідженнями чи технічним оглядом. Зазвичай раптові відмови обумовлені стрибкоподібним зміною одного або декількох параметрів об'єкту.

Поступова відмова – відмова, спричинена поступовими змінами значень одного чи декількох параметрів об'єкта. Поступову відмову можна передбачити попередніми дослідженнями чи технічним оглядом, інколи її можна уникнути заходами технічного обслуговування.

5.2.3 Відмови технічних об'єктів за трудомісткістю усунення

За трудомісткістю (за складністю) усунення виділяють відмови:

- що легко усуваються: відмови, на усунення яких необхідно затратити менше 2 людино-годин трудомісткості;
- що середньо усуваються: відмови, на усунення яких необхідно затратити від 2 до 4 людино-годин;
- що важко усуваються: відмови, на усунення яких необхідно затратити більше 4 людино-годин.

5.2.4 Відмови технічних об'єктів за причинами виникнення (за походженням)

Причинами відмови є обставини, які виникли під час проектування, виробництва чи використання об'єкта, які привели до відмови. За причинами виникнення диференціюють конструкційні, виробничі, експлуатаційні та деградаційні відмови.

Конструкційна відмова – відмова, спричинена недосконалістю чи порушенням встановлених правил і (чи), норм проектування та конструювання об'єкта.

Виробнича відмова – відмова, спричинена невідповідністю виготовлення об'єкта до його проекту чи до норм виробничого процесу;

Експлуатаційна відмова – відмова, викликана порушенням правил експлуатації об'єкта.

Деградаційна відмова – відмова, спричинена процесами деградації в об'єкті при дотриманні усіх встановлених правил і (чи) норм його проектування, виготовлення та експлуатації. Зазвичай деградаційні відмови викликають природні процеси старіння, втоми, корозії.

5.2.5 Відмови технічних об'єктів за впливом на стан

За впливом на стан об'єкту відмови поділяють на ***функціональні й параметричні***. Наприклад, для нафтоперекачувального насоса відмови, що зумовлюють його зупинку, належать до функціональних, а зменшення продуктивності або тиску нижче від граничного рівня — до параметричних. За наявності параметричних відмов технічний об'єкт може працювати з відхиленням від технічних вимог.

5.2.6 Відмови за характером виникнення і можливістю прогнозування

За характером виникнення і можливістю прогнозування розрізняють відмови: через перевантаження; спричинені дією навантажень, які перевищують допустимі межі; через неправильне поводження з об'єктом; через неміцність складових елементів об'єкта; спричинені процесами деградації (старіння); раптові, які неможливо передбачити попереднім оглядом чи діагностуванням; поступові, спричинені поступовою зміною значень технічних параметрів об'єкта, настання яких можна спрогнозувати; повторювана відмова як самоусувна відмова одного і того самого характеру, що виникає багатократно.

5.2.7 Відмови технічних об'єктів за залежністю

Виділяють залежні і незалежні відмови об'єкту.

Залежна відмова – відмова об'єкта, спричинена прямо чи непрямо відмовою або несправністю іншого об'єкту.

Незалежна відмова – відмова об'єкта, не спричинена прямо чи непрямо відмовою або несправністю іншого об'єкта, тобто не залежить від стану інших об'єктів.

5.2.8 Відмови технічних об'єктів за характером виявлення

За характером виявлення розрізняють явні та приховані відмови.

Явна відмова – відмова, що виявляється візуально або штатними методами і засобами контролю та діагностування під час підготовки об'єкта до використання чи в процесі його використання за призначенням.

Прихована відмова – відмова, що не виявляється візуально чи штатними методами і засобами контролю та діагностики, але виявляється під час проведення технічного обслуговування чи спеціальними методами діагностики.

Контрольні питання

1. Дайте визначення збою технічного об'єкту.
2. Яку відмову називають ресурсною?
3. Наведіть класифікацію відмов технічних об'єктів за причинами виникнення.
4. Якими є причини експлуатаційних відмов технічних об'єктів?
5. Наведіть класифікацію відмов технічних об'єктів за характером виникнення і можливістю прогнозування.

ТЕМА 6: МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ

- 6.1 Основні визначення теорії ймовірності.
- 6.2 Закон розподілу випадкової величини.
- 6.3 Щільність розподілу випадкової величини.
- 6.4 Основні числові характеристики випадкової величини.

6.1 Основні визначення теорії ймовірності

Під подією розуміють будь-який факт, який може статися в результаті дослідження або випробування. Під дослідженням, або випробуванням, розуміють здійснення певного комплексу умов.

Розрізняють події *спільні* і *несумісні*. Події називають спільними, якщо настання одного з них не виключає настання іншого. В іншому випадку події називаються несумісними.

Подію називають *достовірною*, якщо вона обов'язково станеться в умовах даного випробування.

Подію називають *неможливою*, якщо воно не може відбутися в умовах даного випробування.

Подію називають *можливою*, або *випадковою*, якщо в результаті випробування вона може статися, але може і не відбутися.

Події називають *рівноможливими*, якщо за умовами випробування жодна з цих подій не є об'єктивно більш можливою, ніж інші.

Важливим поняттям є *повна група подій*. Кілька подій в даному випробуванні утворюють повну групу, якщо в результаті випробування обов'язково з'явиться хоча б одна з них.

Введемо поняття протилежної, або додаткової, події. Під протилежною подією $\bar{A}$ (не A , доповнення A) розуміють подію, яка обов'язково має статися, якщо не настане певне подія A . Протилежні події є несумісними і єдино можливими. Вони утворюють повну групу подій.

Для вираження можливості настання якої-небудь події в якості чисельної величини використовують значення ймовірності. Одне з перших досліджень по теорії ймовірності було присвячено грі в кістки і належить італійському вченому Нікколо Тартальї (1499-1557 рр.). Воно називалося «Загальне правило даного автора, знайдене в перший день посту 1523 року у Вероні, щоб вміти знайти, скількома способами можна варіювати положення якої завгодно кількості кісток при їх метанні».

Імовірністю події A називають число $P\{A\}$, що є висловлюванням міри об'єктивної можливості появи події. Імовірність кожного з двох можливих подій A або B можна обчислити за формулою:

$$R(A) = \frac{m}{n}, \quad (6.1)$$

де m — число випадків, коли подія A може здійснитися;

n — загальна кількість випадків реалізації подій A і B .

Імовірність події A дорівнює відношенню числа випадків m , які є сприятливими до нього, з загального числа n єдино можливих, рівноможливих і несумісних випадків до числа n .

З формули (6.1) випливає, що ймовірність події є ненегативним числом і може змінюватися в межах від нуля до одиниці в залежності від того, яку частку становить число сприятливих випадків від загального числа випадків:

$$0 \leq m \leq n, \quad 0 \leq P\{A\} \leq 1.$$

Змінну величину називають випадковою, якщо в результаті випробування вона може приймати дійсні значення з певними ймовірностями. Якщо множина можливих значень випадкової величини є рахунковим, то її називають **дискретною**. В іншому випадку її називають **безперервною**.

Якщо в результаті випробування може з'явитися або не з'явитися деяка подія, A то замість події A можна розглянути випадкову величину X , яка дорівнює 1, якщо подія A відбувається, і дорівнює 0, якщо подія A не відбувається. Випадкова величина X , очевидно, є переривчастою; вона має два можливих значення: 0 і 1. Цю випадкову величину називають характеристичною випадковою величиною події A .

На практиці часто замість подій є зручнішим оперувати їх характеристичними випадковими величинами.

Надалі будемо випадкові величини позначати великими літерами, а їх можливі значення - відповідними малими літерами. Наприклад, X - число випадання «орлів» при киданні монети три рази; можливі значення: $x_1 = 0$; $x_2 = 1$; $x_3 = 2$; $x_4 = 0$.

6.2 Закон розподілу випадкової величини

Розглянемо перериваних випадкову величину X з можливими значеннями $x_1, x_2, \dots, x_n$. Кожне з цих значень є можливим, але не достовірним, і величина X може прийняти кожне з них з певною ймовірністю. В результаті випробування

величина X прийме одне з цих значень, тобто відбудеться одне з повної групи несумісних подій:

$$\left. \begin{array}{l} X = x_1 \\ X = x_2 \\ \dots \\ X = x_n \end{array} \right\}. \quad (6.2)$$

Позначимо ймовірності цих подій:

$$P(X = x_1) = p_1; P(X = x_2) = p_2; \dots P(X = x_n) = p_n.$$

Через те, що несумісні події (6.2) утворюють повну групу, маємо

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1,$$

тобто сума ймовірностей всіх можливих значень випадкової величини дорівнює одиниці. Ця сумарна ймовірність є якимось чином розподіленою між окремими значеннями. Випадкова величина буде повністю описана з ймовірнісної точки зору, якщо цей розподіл буде заданим, тобто в точності зазначено, яку ймовірність має кожна з подій (6.2). Цим встановлюють так званий закон розподілу випадкової величини.

Законом розподілу випадкової величини називають всяке співвідношення, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини і відповідними їм ймовірностями. Про випадкову величину ми будемо говорити, що вона підпорядкована цьому закону розподілу.

Найпростішою формою завдання цього закону є таблиця, в якій перераховані можливі значення випадкової величини і відповідні їм ймовірності.

Таблиця 6.1 - Ряд розподілу дискретної випадкової величини

x_i	x_1	x_2	$\dots$	x_n
p_i	p_1	p_2	$\dots$	p_n

Таку таблицю називають рядом розподілу випадкової величини X . Якщо по осі абсцис відкласти можливі значення випадкової величини, а по осі ординат - ймовірності цих значень і отримані точки з'єднати відрізками прямих, то буде побудовано фігуру, яку називають **багатокутником розподілу** (рис. 6.1).

Багатокутник розподілу, так само як і ряд розподілу, повністю характеризує випадкову величину; він є однією з форм закону розподілу.

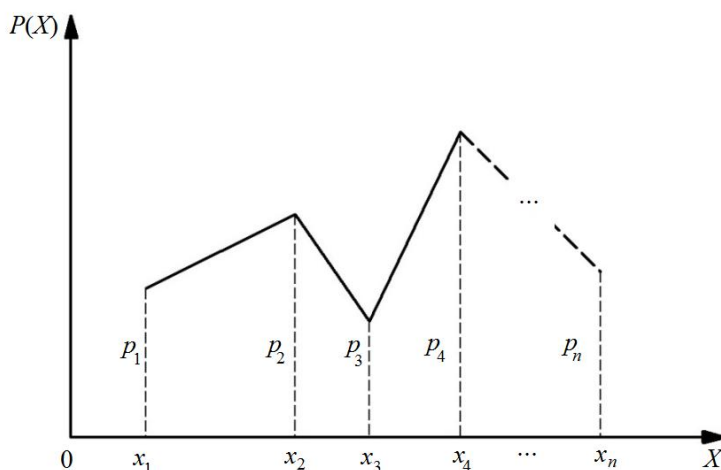


Рисунок 6.1 - Багатокутник розподілу

Закон розподілу дискретної випадкової величини - це відповідність між окремими можливими значеннями і їх ймовірностями.

Закон розподілу дискретної випадкової величини простіше уявити у вигляді таблиці розподілу, в першому рядку якої вказують можливі значення випадкової величини, а у другому рядку - відповідні ймовірності цих значень.

Змінна величина називається **випадковою**, якщо в результаті випробувань вона може приймати дійсні значення з певними ймовірностями. Найбільш повною, вичерпною характеристикою випадкової величини є закон розподілу. **Закон розподілу** - функція (таблиця, графік, формула), яка дозволяє визначати ймовірність того, що випадкова величина X приймає певне значення x_i або потрапляє в певний інтервал.

Для випадкової безперервної величини T можливі значення заповнюють «незліченну безліч», і скласти таблицю (ряд розподілу), в якій були б перераховані всі можливі значення, є неможливим.

Однак різні області можливих значень випадкової безперервної величини все ж не є рівноімовірними. Тому для випадкової безперервної величини T користуються не ймовірністю події, а ймовірністю події $p_i(T = t_i)$, де t - деяка поточна змінна.

Залежність ймовірності $P(T < t)$ від t називають функцією розподілу випадкової безперервної величини T і позначають:

$$F(t) = P(T < t).$$

Функцію розподілу називають також інтегральною функцією розподілу або інтегральним законом розподілу. Функція розподілу, як і будь-яка ймовірність, є величиною безрозмірною. Основні властивості функції розподілу є такими:

– ймовірність того, що випадкова величина T приймає значення в проміжку $[\alpha, \beta]$ дорівнює різниці значень функції розподілу на кінцях цього проміжку, тобто

$$P\{\alpha \leq T < \beta\} = F(\beta) - F(\alpha).$$

– функція розподілу $F(t)$ є неспадною функцією свого аргументу, тобто

$$F(t_2) \geq F(t_1), \text{ якщо } t_2 > t_1.$$

– значення функції розподілу $F(t)$ укладені в межах $0 \leq F(t) \leq 1$, оскільки

$$F(-\infty) = 0; \quad F(\infty) = 1.$$

Функція розподілу випадкової безперервної величини T є безперервною в усіх точках. Графік функції розподілу випадкової безперервної величини має вигляд, показаний на рис. 6.2 а.

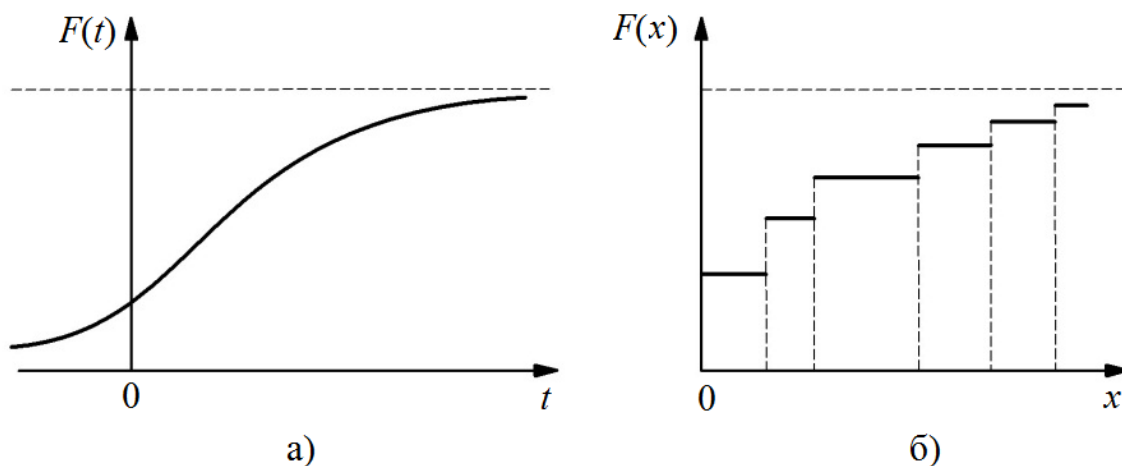


Рисунок 6.2 - Функція розподілу випадкової величини:
а) безперервної; б) дискретної

6.3 Щільність розподілу випадкової величини

Дійсно, для випадкової дискретної величини X

$$F(x) = P(X < x) = \sum_{x_i < x} P(X < x_i),$$

де $x_i < x$ під знаком суми вказує на те, що підсумовуються всі ті ймовірності, для яких $x_i < x$. Графік функції розподілу випадкової дискретної величини X є «ступінчастою» лінією, яка змінюється стрибком і є безперервною зліва в кожній точці x_i (рис. 6.2, б).

Для випадкової безперервної величини T є справедливою гранична рівність

$$\lim_{\alpha \rightarrow \beta} P\{\alpha \leq T \leq \beta\} = \lim_{\alpha \rightarrow \beta} [F(\beta) - F(\alpha)] = P(t = \beta), \quad (6.3)$$

тобто ймовірність того, що випадкова безперервна величина прийме якесь певне значення (у виразі (6.3) $T = \beta$), дорівнює нулю. Тому випадкову безперервну величину T зручніше характеризувати функцією

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (6.4)$$

Функцію $f(t)$ називають **щільністю розподілу ймовірностей**. Щільність розподілу ймовірностей $f(t)$ називають також диференціальною функцією розподілу або **диференціальним законом розподілу випадкової величини**. Графік функції (рис. 6.3) називають кривою розподілу випадкової безперервної величини.

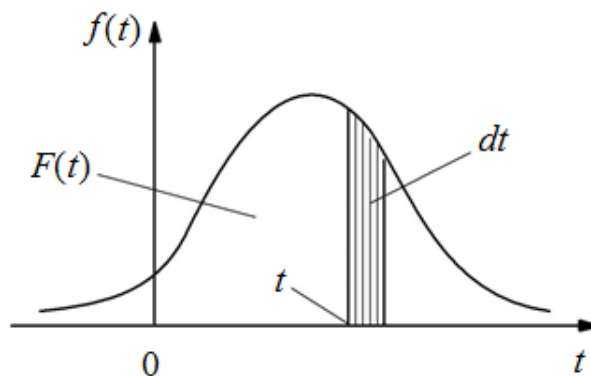


Рисунок 6.3 - Крива розподілу неперервної випадкової величини

Щільність розподілу $f(t)$, як і функція розподілу $F(t)$, є однією з форм закону розподілу. Але існує вона лише для *випадкових безперервних величин*.

Ймовірність влучення випадкової безперервної величини T на ділянку dt , що примикає до точки t (див. рис. 6.3), з точністю до малих вищого порядку дорівнює $f(t)dt$. Величину $f(t)dt$ називають *елементом ймовірності*. Тому ймовірність попадання випадкової безперервної величини T на проміжок $[\alpha, \beta]$ через щільність розподілу $f(t)$ визначають за формулою

$$P\{\alpha < T < \beta\} = \int_{\alpha}^{\beta} f(t)dt. \quad (6.5)$$

Функцію розподілу $F(t)$ через щільність розподілу $f(t)$ визначається виразом

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt. \quad (6.6)$$

Тому геометрично $F(t)$ є площею під кривою розподілу, що лежить лівіше точки t (див. рис. 6.3).

Щільність розподілу $f(t)$ має розмірність, обернену розмірності випадкової величини.

6.4 Основні числові характеристики випадкової величини

Основними числовими характеристиками випадкової величини є математичне очікування, дисперсія і середнє квадратичне відхилення.

Математичним очікуванням $M[X]$ (середнім значенням) випадкової дискретної величини називають суму добутків всіх можливих значень випадкової величини x_i на відповідні їм ймовірності p_i :

$$M[X] = m_x = \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i. \quad (6.7)$$

Дисперсією $D[X]$ випадкової дискретної величини X називають математичне сподівання квадрата відхилення випадкової величини від її математичного очікування:

$$D[X] = M[(X - m_x)^2] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \cdot p_i. \quad (6.8)$$

Дисперсія являє собою характеристику розсіювання (розкиданості) випадкової величини близько її математичного очікування і має розмірність квадрата випадкової величини.

Середнє квадратичне відхилення σ_x випадкової дискретної величини X являє собою корінь квадратний з дисперсії:

$$\sigma_x = \sqrt{D[X]}. \quad (6.9)$$

Середнє квадратичне відхилення має розмірність випадкової величини і в порівнянні з дисперсією має велику наочність як характеристика розсіювання випадкової величини.

Математичне сподівання, дисперсія і середнє квадратичне відхилення випадкової безперервної величини визначають за аналогією наступними співвідношеннями:

$$M[T] = m_t = \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot f(t) dt;$$

$$D[T] = M[(t - m_t)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (t - m_t)^2 \cdot f(t) dt;$$

$$\sigma_t = \sqrt{D[T]},$$

де $f(t)$ - щільність розподілу випадкової безперервної величини T .

Контрольні питання

1. Що розуміють під подією та під випробуванням?
2. Які події називають спільними?
3. Яку подію називають достовірною?
4. Що розуміють під ймовірністю події?
5. Якою є різниця між безперервними і дискретними величинами?
6. Який зв'язок встановлює закон розподілу випадкової величини?

7. Дайте визначення диференціального закону розподілу випадкової величини.
8. Що є математичним очікуванням випадкової дискретної величини?
9. Що називають дисперсією випадкової дискретної величини? Яку вона має розмірність?
10. Дайте визначення середнього квадратичного відхилення випадкової дискретної величини. Яку воно має розмірність?

ТЕМА 7: ЯКІСТЬ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕКОНОМІЧНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

7.1 Якість і надійність технічних об'єктів і систем.

7.2 Надійність та ефективність об'єктів і систем.

7.3 Економічні показники надійності.

Показники надійності закладають на стадії проектування виробів, забезпечують під час їх виробництва і підтримують у період експлуатації [2].

Терміни і визначення основних понять в області якості продукції наведені в ДСТУ 3230–95 „Управління якістю та забезпечення якості. Терміни та визначення”. ДСТУ ISO 9001–1998 установлює моделі забезпечення якості в процесі проектування, виробництва і обслуговування виробів, а ДСТУ ISO 9004–1998 — опис елементів, що мають складати систему забезпечення якості виробів на підприємстві. Вибір номенклатури показників для оцінювання рівня якості продукції залежить від мети цього оцінювання.

7.1 Якість і надійність технічних об'єктів і систем

Якість — це сукупність властивостей, що визначає ступінь відповідності продукції її призначенню. Якість — поняття об'єднувальне і складається принаймні з десяти основних показників: відповідність основному призначенню; надійність; вартість; технологічність і матеріаломісткість; безпека; екологічність і енергозатратність; естетичність; ергономічність; стандартизованість; патентоспроможність.

Показники призначення продукції характеризують основні функції, для виконання яких вона призначена (працездатність, технічні параметри машин, наприклад продуктивність, швидкість, точність, тощо).

Показники надійності характеризують зміну основних показників призначення в часі. Основні показники надійності — це безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збережність і готовність.

Економічні показники характеризують затрати на розроблення, виготовлення та експлуатацію виробу, а також економічну ефективність його експлуатації. Інтегральним економічним показником для споживача є ціна виробу.

Технологічні показники характеризують розподіл затрат матеріалів, засобів праці в часі при технологічній підготовці виробництва, виготовленні та експлуатації продукції (трудомісткість, матеріаломісткість, собівартість).

Показники безпеки кількісно характеризують безпеку людини при використанні виробу (наприклад, імовірність отримання травм під час аварій автомобілів є тим вищою, чим менша маса автомобіля, імовірність вибуху телевізора та ін.).

Екологічні показники характеризують рівень зовнішніх дій, що виникають при експлуатації і споживанні виробу (токсичність вихлопних газів обладнання, наявність нітратів та ядохімікатів у продуктах і воді тощо).

Естетичні показники характеризують композиційну цілісність, інформаційну виразність, раціональність форми, культуру виконання виробу. Кількісні показники тут встановити важко і вони замінюються системою рівнів у п'ятибальній системі: 5 – кращий зі світових; 4 – на рівні світових; 3 – національний рівень; 2 – для внутрішнього ринку; 1 – нижче від рівня внутрішнього ринку.

Ергономічні показники пов'язані з участю людини в роботі чи експлуатації виробу. До таких показників належать гігієнічні, антропологічні, фізіологічні, психологічні, вплив умов експлуатації на людину (вібрація сидіння, шум, загазованість тощо).

Показники стандартизації й уніфікації характеризують насиченість продукції уніфікованими та оригінальними частинами, а також рівень уніфікації з іншими виробами (наприклад, можливість використання програмного забезпечення на різних ЕОМ, касет на різних магнітофонах).

Показники патентоспроможності (патентна чистота, захист авторськими свідоцтвами, патентами) сприяють підвищенню конкурентоспроможності виробу.

Забезпечення одних показників, як правило, суперечить виконанню інших. Розроблення комплексних показників — одне з необхідних завдань оптимізації якості. У багатьох випадках беруть два основних показники: вартість і надійність. Розв'язок задачі оптимізації в цьому разі ілюструється графіком (рис.7.1).

Очевидно, існує деяка оптимальна надійність, до якої слід наближатися. При цьому буде досягнуто найкращого співвідношення затрат на виготовлення й експлуатацію виробу.

7.2 Надійність та ефективність об'єктів і систем

У процесі проектування, як правило, розглядають кілька варіантів конструкції технічного об'єкта чи технічної системи, з яких потім вибирають найкращий.

Ефективність — це ступінь відповідності об'єкта або системи цільовому призначенню за певних умов експлуатації, а критерієм ефективності є певний кількісний показник, який застосовують для оцінювання і порівняння варіантів об'єктів чи систем. Розрізняють показники якості функціонування і вихідний ефект системи.

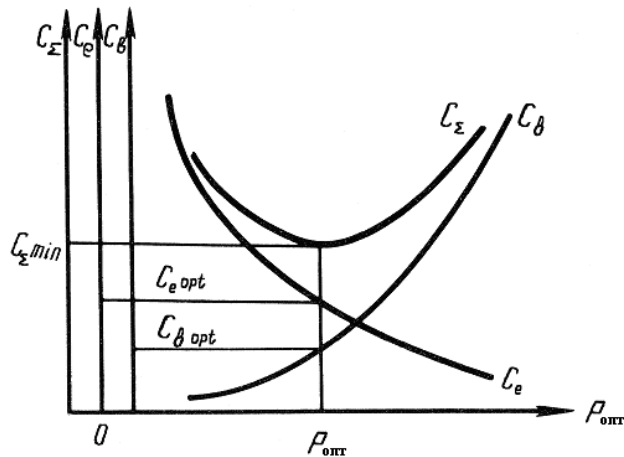


Рисунок 7.1 – Визначення оптимального рівня надійності виробу:

C_B — затрати на виготовлення;

C_e —затрати на експлуатацію;

C_Σ — сумарні затрати;

P — надійність (імовірність безвідмовної роботи)

Ефективність залежить від багатьох чинників, у тому числі від надійності складових елементів. При цьому, для системи в цілому визначаються показники надійності та критерій ефективності, а для окремих елементів оцінка ефективності є не обов'язковою.

Для оцінювання надійності об'єкта можна застосовувати різні показники. Під час вибору їх основним показником надійності слід вважати той, що найкраще характеризує об'єкт і входить до формули визначення ефективності.

Показники ефективності можуть бути ймовірнісними, інформаційними, вартісними. Від цього залежить їх розмірність. Для інформаційних систем, наприклад, розмірністю можуть бути одиниці інформації, для обчислювальних систем – одиниці часу, для автоматичних систем – безрозмірні, адже для них доцільно визначати ймовірність виконання ними заданих функцій.

7.3 Економічні показники надійності

Підвищення безвідмовності та довговічності обладнання нафтогазової галузі пов'язане з одного боку, з додатковими матеріальними витратами, а з іншого, — з підвищенням ефективності капітальних вкладень, зменшенням витрат на ремонт, підвищенням продуктивності машин.

Критерієм ефективності підвищення надійності може бути сума затрат, пов'язаних з виготовленням і експлуатацією технічного об'єкта, віднесена до терміну його доцільної експлуатації:

$$K_e = \frac{Q_B + Q_e}{T_e}, ; \quad (1)$$

де K_e — економічний показник надійності, грн/год;

Q_B — вартість виготовлення нового виробу, грн;

Q_e — сумарні витрати на експлуатацію, ремонт, обслуговування;

T_e — термін доцільної експлуатації виробу, год.

Цей показник має бути мінімальним, що можна забезпечувати за рахунок раціонального розподілу капіталовкладень між сферами виробництва і експлуатації.

За інших однакових умов, чим дешевшим є об'єкт, тим більше затрат припадає на його експлуатацію. Наприклад, при зниженні вартості середньостатистичного електродвигуна на 5 % затрати на його експлуатацію зростають на 13 %.

Співвідношення між вартістю виготовлення і експлуатації виробу характеризується коефіцієнтом експлуатаційних витрат:

$$K_{e.с} = \frac{Q_B}{Q_B + Q_E} < 1, \quad (7.2)$$

де Q_B — затрати на виготовлення виробу;

Q_E — затрати на його експлуатацію

Вищу надійність об'єкту завжди досягають за рахунок додаткових затрат, тому часто користуються поняттям “ціна надійності”.

Загальні затрати на виготовлення об'єкту складаються з постійних затрат Q_{Π} , які не залежать від вимог надійності, та змінних складових затрат Q_H , зумовлених вимогами надійності:

$$Q_{заг} = Q_{\Pi} + Q_H . \quad (7.3)$$

Для прогнозування затрат, пов'язаних з підвищенням надійності, часто застосовують метод порівняння з прототипом на основі загальних емпіричних залежностей, отриманих у результаті оброблення дослідних даних про ціну надійності. У багатьох випадках така залежність для ціни надійності Q_H має степеневий характер:

$$Q_H = Q_{H_0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^a, \quad (7.4)$$

де Q_{H_0} — ціна надійності аналога або прототипу виробу;
 T_0 — напрацювання на відмову (середній термін експлуатації) прототипу;
 T — напрацювання на відмову об'єкту, що проектується;
 a — емпіричний показник, який характеризує рівень прогресивності виробництва з погляду можливостей підвищення надійності ($a \approx 0,5 \dots 1,5$).

Контрольні питання

1. Що розуміють під якістю технічної системи?
2. Від яких чинників залежить ефективність ТС?
3. Як визначити коефіцієнт експлуатаційних витрат ТС?
4. Що характеризує критерій підвищення надійності ТС?

ТЕМА 8: ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ

8.1 Показники безвідмовності невідновлюваних об'єктів.

8.2 Показники надійності відновлюваних об'єктів.

8.3 Закони розподілу, що використовуються в теорії надійності.

Однією з найважливіших характеристик будь-якого технічного об'єкту є надійність.

Показниками надійності називають кількісні характеристики однієї або декількох властивостей, які є складовими надійності об'єкта. У першому випадку показники називають одиничними, у другому - комплексними. Показники надійності відносять до числа найважливіших понять статистичної теорії надійності.

Як вже було сказано, **надійність** - властивість об'єкту (системи), що полягає в його здатності виконувати свої функції в певних умовах експлуатації, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування.

Надійність є складною властивістю і формується такими складовими, як безвідмовність, довговічність, відновлюваність і збереженість. Основним тут є властивість безвідмовності - здатність виробу безупинно зберігати працездатний стан протягом часу.

Безвідмовність (і інші складові властивості надійності) об'єкту проявляється через випадкові величини: напрацювання до чергової відмови і кількість відмов за заданий час. Тому кількісними характеристиками властивості тут виступають імовірнісні змінні.

Напрацювання є тривалість або обсяг роботи об'єкта. Для невідновлюваних і відновлюваних об'єктів поняття напрацювання розрізняється: у першому випадку мають на увазі напрацювання до першої відмови, у другому - між двома сусідніми в часі відмовами (після кожної відмови проводять відновлення працездатного стану).

8.1 Показники безвідмовності невідновлюваних об'єктів

Найбільш важливими показниками надійності невідновлюваних об'єктів є показники безвідмовності, до яких відносять:

- ймовірність безвідмовної роботи;
- щільність розподілу відмов;
- інтенсивність відмов;
- середнє напрацювання до відмови.

Показники надійності представляють в двох формах (визначеннях):

- статистична (вибіркові оцінки);
- імовірнісна.

Статистичні визначення (вибіркові оцінки) показників виходять за результатами випробувань на надійність.

Припустимо, що в ході випробувань якогось числа однотипних об'єктів було отримано кінцеве число значень досліджуваного параметра - напрацювання до відмови. Отримані числа є вибіркою якогось обсягу із загальної «генеральної сукупності», яка має необмежений обсяг даних про напрацювання до відмови об'єкта.

Кількісні показники, визначені для «генеральної сукупності», є істинними (імовірнісними) показниками, оскільки об'єктивно характеризують випадкову величину - напрацювання до відмови.

Показники, які визначені для вибірки і які дозволяють зробити якісь висновки про випадкову величину, є вибірковими (статистичними) оцінками. Очевидно, що при досить великій кількості випробувань (великий вибірці) оцінки наближаються до імовірнісних показників.

Імовірнісна форма подання показників є зручною при аналітичних розрахунках, а статистична - при експериментальному дослідженні надійності.

8.1.1 Ймовірнісне визначення

Перейдемо до розгляду показників безвідмовності невідновлюваного елемента системи, який є працездатним в момент початку роботи $t = 0$ і який працює до першої відмови, яка настає в випадковий момент $t = \tau$.

Надійність такого елемента повністю визначає його безвідмовність, а показники безвідмовності - характеристики випадкової величини τ , яку часто називають часом життя елемента.

Безвідмовність (і інші складові властивості надійності) обладнання проявляється через випадкові величини: напрацювання до чергової відмови і кількість відмов за заданий час. Тому кількісними характеристиками властивості тут виступають імовірнісні змінні.

Напрацювання є тривалістю або обсягом роботи об'єкта. Для об'єктів нафтогазової галузі є природним числення напрацювання в одиницях часу, тоді як для інших технічних засобів можуть існувати більш зручні інші засоби вимірювання (наприклад, напрацювання автомобіля - в кілометрах пробігу). Для невідновлюваних і відновлюваних об'єктів поняття напрацювання розрізняється: у першому випадку мають на увазі напрацювання до першої відмови (вона же є і останньою відмовою), у другому - між двома сусідніми в часі відмовами (після кожної відмови проводять відновлення працездатного стану).

Імовірність відмови або функція ненадійності вимірюється ймовірністю того, що час безвідмовної роботи τ буде менше, ніж заданий t , і відповідає функції розподілу величини τ :

$$Q(t) = \text{Ймовірність } (\tau \leq t) = F(t) \quad (8.1)$$

Щільність ймовірності відмови (або частота відмов):

$$q(t) = \frac{dQ(t)}{dt}. \quad (8.2)$$

Функція надійності елемента є ймовірність безвідмовної роботи елемента за час τ :

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - F(t) = \text{Ймовірність } (\tau > t) \quad (8.3)$$

Очевидним є зв'язок функції надійності та функції ненадійності елемента:

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (8.4)$$

Цей вираз є одним з основних в теорії надійності.

Характерний вид наведених функцій показаний на рис. 8.1.

Середній час безвідмовної роботи T_0 , або середнє напрацювання до відмови, є математичним очікуванням випадкової величини τ . Він може бути представленим у вигляді:

$$T_0 = M[\tau] = \int_0^{\infty} tq(t)dt \quad \text{або} \quad T_0 = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (8.5)$$

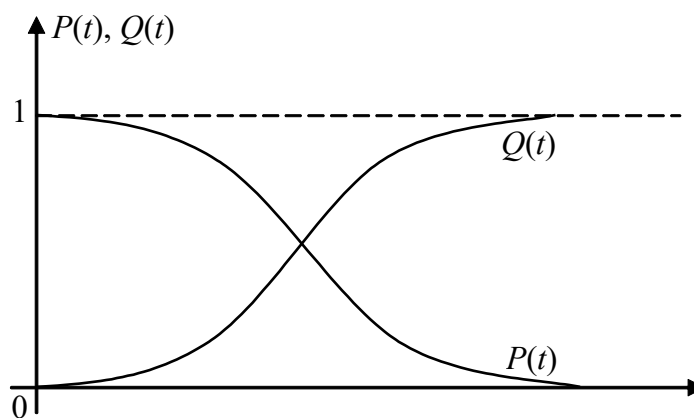


Рисунок 8.1 Функції надійності і ненадійності об'єкта

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ є умовною щільністю ймовірності $q(t)$ виникнення відмови об'єкта, яку визначають для даного моменту часу за умови, що до цього моменту відмова не виникла:

$$\lambda(t) = \frac{q(t)}{P(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} . \quad (8.6)$$

Зв'язок функції надійності та інтенсивності відмов називають **основним законом надійності** і визначають як:

$$P(t) = \exp \left[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right] . \quad (8.7)$$

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ під час експлуатації для багатьох об'єктів має характерний вигляд (рис. 8.2) для різних періодів експлуатації. Експлуатація майже всіх об'єктів передбачає три періоди, що характеризуються різною інтенсивністю відмов.

У період I (інтервал $(0; t_1)$) інтенсивність відмов зменшується. Цей інтервал відповідає виявленню грубих дефектів, його часто називають періодом припрацювання елементів об'єкту або періодом випалювання несправностей, тренування. Під час експлуатації в цей період виникають відмови припрацювання, пов'язані з тим, що не всі елементи технічної системи (об'єкту) припрацювались, або з проявленням дефектів, що не були виявлені при його виготовленні.

У періоді II (інтервал $(0; t_2)$), часто званому періодом нормальної експлуатації, інтенсивність відмов може залишатися незмінною. Вони зумовлені несприятливим поєднанням різних причин, у тому числі частковим спрацюванням елементів, серед яких немає таких, які б переважали.

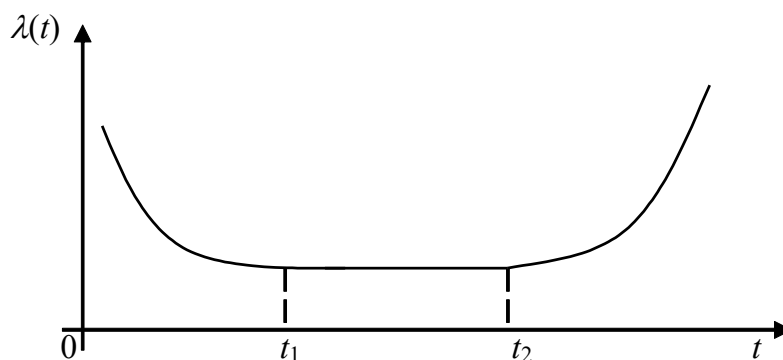


Рисунок 8.2 - Характерна зміна інтенсивності потоку відмов відповідно періодів експлуатації

У періоді ІІІ (інтервал $(t_2; \infty)$), званому періодом старіння і зносу, відбувається зростання інтенсивності відмов. Відбуваються спрацьовані відмови, зумовлені тим, що стан основних функціональних елементів досягає граничного рівня і створюються умови для інтенсивної генерації відмов.

У разі постійності інтенсивності відмов $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$, тоді (8.7) переходить у відомий в теорії ймовірностей експонентний розподіл:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (8.8)$$

Цей вираз називають експонентним законом часу життя елемента. Для експонентного розподілу формула (8.5) набуває вигляду:

$$T_0 = 1/\lambda. \quad (8.9)$$

Отже, при простому потоці відмов середнє напрацювання T_0 є оберненим до інтенсивності відмов λ .

За допомогою (8.8) можна показати, що за час середнього напрацювання $t = T_0$ ймовірність безвідмовної роботи об'єкту становить $1/e$. Часто використовують характеристику, звану γ - процентним напрацюванням - час, протягом якого відмова не настане з ймовірністю γ (%):

$$T_\gamma = -\frac{\ln P_\gamma}{\lambda} = -T_0 \ln P_\gamma, \quad P_\gamma = \frac{\gamma}{100}. \quad (8.10)$$

Вибір параметра для кількісної оцінки надійності визначається призначенням, режимами роботи об'єкту, зручністю застосування в розрахунках на стадії проектування.

8.1.2 Статистичне визначення

Введемо позначення:

$n(t)$ - число відмовили об'єктів до моменту t ;

$N(t)$ - число працездатних об'єктів до моменту t ;

$\Delta n(t_1, t_2)$ - число відмовили об'єктів в інтервалі часу $[t_1, t_2]$.

Статистичну оцінку ймовірності безвідмовної роботи (ЙБР) (емпіричну функцію надійності) визначають як

$$\bar{P}(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = 1 - \frac{n(t)}{N}. \quad (8.11)$$

Оцінка ймовірності відмови (ЙВ):

$$\bar{Q}(t) = \frac{n(t)}{N}. \quad (8.12)$$

Статистична оцінка щільності розподілу відмов (ЩРВ):

$$\bar{f}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t}. \quad (8.13)$$

Статистична оцінка інтенсивності відмов:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}. \quad (8.14)$$

Статистична оцінка середнього напрацювання до відмови:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i \quad (8.15)$$

8.1.3 Показники розсіювання

Крім показника середнього напрацювання, слід враховувати показники розсіювання, до числа яких відносять дисперсію і середнє квадратичне відхилення (СКВ) напрацювання до відмови.

Дисперсія випадкової величини напрацювання:

– ймовірнісне визначення

$$D = D[t] = M \left[(t_i - T_0)^2 \right] = \int_0^{\infty} (t_i - T_0)^2 \cdot f(t) dt \quad (8.16)$$

– статистична оцінка

$$\bar{D} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{T}_0)^2 \quad (8.17)$$

СКВ випадкової величини напрацювання:

$$\bar{S}^2 = \bar{D}. \quad (8.18)$$

8.2 Показники надійності відновлюваних об'єктів

Для того щоб знайти показники, що характеризують надійність відновлювального об'єкта, необхідно визначити модель його функціонування.

Найпростішою є така модель, при якій об'єкт якийсь випадковий час τ_1 працює до першої відмови, який фіксують достовірно, потім настає миттєве і повне відновлення властивостей елемента в момент $t_1 = \tau_1$, після чого елемент знову працює випадковий час τ_2 до другої відмови, що визначають достовірно, потім миттєво відновлюється до початкового стану в момент $t_2 = \tau_1 + \tau_2$ і так далі. Для визначеності вважають, що в початковий момент часу елемент є працездатним (рис. 8.3).

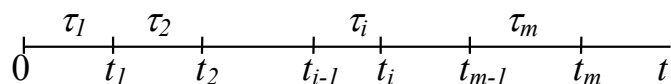


Рисунок 8.3 - Модель функціонування миттєво відновлюваного елемента

Моменти відмов $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_m$ утворюють *випадковий потік* (або процес) *відмов*, а через те, що відновлення настає миттєво, то ці ж моменти утворюють *випадковий потік* (або процес) *відновлення*.

Сумарне напрацювання до виникнення m -ї відмови дорівнює:

$$t_m = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_m = \sum_{i=1}^m \tau_i \quad (8.19)$$

Є можливими два шляхи оцінки надійності відновлюваних об'єктів:

- 1) обчислення характеристик потоку відмов;
- 2) обчислення умовних розподілів напрацювання між відмовами.

Процес відновлення можна описати випадковою величиною $r(t)$, яка дорівнює числу відмов, що відбулися за час t . Природно, що $r(t)$ приймає тільки цілі ненегативні значення. Величину $r(t)$ можна характеризувати математичним сподіванням числа відмов, що відбулися на інтервалі $(0, t)$:

$$M[r(t)] = \Omega(t), \quad (8.20)$$

яку зазвичай називають *провідною функцією потоку відмов* або *функцією відновлення*. Часто зручно використовувати функцію

$$\omega(t) = \frac{d\Omega(t)}{dt},$$

яку називають *щільністю відновлення* (відмов) або *параметром потоку відновлення* (відмови).

Параметр потоку відмов є відношенням середнього числа відмов відновлюваного об'єкта за довільно мале його напрацювання до значення цього напрацювання.

Випадкова величина $r(t)$ має розподіл з законом

$$\text{Ймовірність}[r(t) \geq m] = P[r(t) \geq m] = P[\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_m < t] = F_m(t), \quad (8.21)$$

де $F_m(t)$ - закон розподілу випадкової величини t_m .

Ймовірність того, що за час t не відбудеться жодного відновлення (відмови):

$$P[r(t) = 0] = P(t) = 1 - P(\tau_1 < t) = 1 - F(t), \quad (8.22)$$

де $F(t) = F_1(t)$ - ймовірність першої відмови.

У загальному випадку ймовірність того, що за час t відбудеться рівно m відновлень (відмов), визначається залежністю:

$$P[r(t) = m] = P_m(t) = F_m(t) - F_{m+1}(t). \quad (8.23)$$

За визначенням математичного очікування маємо:

$$\Omega(t) = M[r(t)] = \sum_{m=1}^{\infty} m P_m(t) = \sum_{m=1}^{\infty} F_m(t). \quad (8.24)$$

ВІДПОВІДНО

$$\omega(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{dF_m(t)}{dt} = \sum_{m=1}^{\infty} f_m(t) = \frac{d\Omega(t)}{dt}, \quad (8.25)$$

де $f_m(t)$ - щільність ймовірності випадкової величини t_m .

У статистичній формі:

$$\bar{\omega}(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (8.26)$$

де $n(t_i)$ - кількість відмов, зафіксоване після закінчення t_i .

Для випадку експонентного закону розподілу часу між відновленнями або відмовами:

$$F_1(t) = F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{і} \quad P_0(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}.$$

Процес відновлення є пуассоновським потоком, для якого ймовірність отримання рівно m відновлень (відмов)

$$P[r(t) = m] = P_m(t) = \frac{(\lambda \cdot t)^m}{m!} e^{-\lambda t}, \quad (8.27)$$

де λt - математичне очікування числа відновлень (відмов) на інтервалі $(0, t)$, тобто

$$\Omega(t) = \lambda t. \quad (8.28)$$

тоді

$$\frac{d\Omega(t)}{dt} = \omega(t) = \lambda. \quad (8.29)$$

Таким чином, для експонентного закону щільність відновлення (або параметр потоку відмов) чисельно дорівнює інтенсивності відмов λ невідновлюваного елемента, який працює до першої відмови.

Часто буває важливим встановити асимптотичні властивості процесу відновлення - його характеристики при великому часі t , після того як спостерігали велику кількість відмов при довільному законі $F(t)$. Можна показати, що

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\Omega(t)}{t} = \frac{1}{T_0}. \quad (8.30)$$

З формули (8.30) видно, що для тривалої ділянки часу t середнє число відмов, що припадають на одиницю часу, є величиною, зворотною до середнього часу життя елементу.

Отже, якщо розглядати стаціонарний процес, то частина формул спроститься. Середнє напрацювання між відмовами відновлюваного об'єкту:

$$\tau = \frac{1}{\omega_{\tau_p}} = \frac{\tau_p}{\Omega(\tau_p)}. \quad (8.31)$$

А з урахуванням (8.29):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \omega = \frac{1}{\tau}. \quad (8.32)$$

Отримані вище залежності є справедливими для найпростішого процесу відновлення (миттєве і повне відновлення властивостей елемента при достовірно фіксованій відмові). На практиці час відновлення має кінцеві випадкові значення, що залежить як від властивостей елемента, так і від характеристик персоналу, що веде відновлення, організації робіт, наявності запасних елементів та інших об'єктивних і суб'єктивних факторів.

Представимо модель функціонування елемента (рис. 8.4) в наступному вигляді: працездатний в момент $t=0$ елемент функціонує протягом випадкового часу τ_1 до першої відмови, фіксованої достовірно в момент $t_1 = \tau_1$, потім протягом випадкового часу τ_{1e} елемент відновлюють повністю до стану, в якому він знаходився в момент $t=0$, і працює він випадковий час τ_2 до другої відмови, фіксованої достовірно в момент $t_2 = \tau_1 + \tau_{1e} + \tau_2$, потім його відновлюють за випадковий час τ_{2e} до початкового стану і так далі. Моменти

$$t_m = \tau_1 + \tau_{1e} + \tau_2 + \tau_{2e} + \dots + \tau_i + \tau_{ie} + \dots + \tau_m \quad (8.33)$$

складають потік відмов, а моменти

$$t_{me} = \tau_1 + \tau_{1e} + \tau_2 + \tau_{2e} + \dots + \tau_i + \tau_{ie} + \dots + \tau_m + \tau_{me} \quad (8.34)$$

утворюють потік відновлень елемента (причому $m = 1, 2, \dots$).

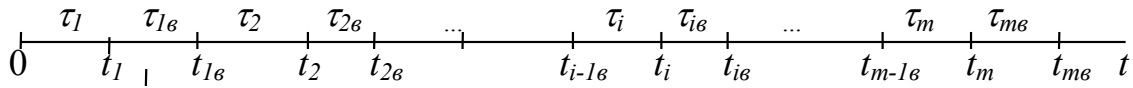


Рисунок 8.4 - Модель функціонування елемента, відновлюваного за кінцевий час

Будемо вважати, що всі випадкові величини $\tau_i = \tau$ і $\tau_{ie} = \tau_e$ ($i = 1, \dots, m$) є незалежними.

Крім того, у всіх $\tau_i = \tau$ закон розподілу є однаковим $F(t) = P(\tau < t)$ з математичним сподіванням $M[\tau] = T_1$ і СКВ $\sigma_1 = \sqrt{D[T]}$, а також всі величини розподілені однаково з законом $G(t) = P(\tau_e < t)$ з математичним сподіванням $M[\tau_e] = T_2$ і СКВ $\sigma_2 = \sqrt{D[\tau_e]}$.

З використанням наведених функцій запишемо формули для визначення деяких параметрів для часу відновлення об'єкту.

Середній час відновлення об'єкту:

$$\tau_e = M\{\tau_{ie}\} = \int_0^{\infty} t g(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - G(t)] dt \quad (8.35)$$

або в статистичній формі

$$\bar{\tau}_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{ie} \quad (8.36)$$

Інтенсивність відновлення об'єкта в момент часу t , відлічуваний від моменту початку відновлення:

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1 - G(t)} \quad (8.37)$$

або в статистичній формі

$$\bar{\mu}(t) = \frac{\Delta n_{\epsilon}(t, t + \Delta t)}{N_{\epsilon}(t) \cdot \Delta t}, \quad (8.38)$$

де $\Delta n_{\epsilon}(t, t + \Delta t)$ - число відновлень в інтервалі часу $[t, t + \Delta t]$;

$N_{\epsilon}(t)$ - число об'єктів, ще не відновлених до моменту t ;

Δt - довжина інтервалу.

Найважливішим показником надійності такого елемента є коефіцієнт готовності $K_{\epsilon}(t)$, він представляє собою ймовірність того, що елемент виявиться працездатним в довільний момент часу t .

У практиці зазвичай використовують стаціонарне значення коефіцієнта готовності k_{ϵ} , до якого прагне функція $K_{\epsilon}(t)$ при $t \rightarrow \infty$. Можна показати, що

$$k_{\epsilon} = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{\epsilon}(t) = \frac{T_1}{T_1 + T_2}, \quad (8.39)$$

де T_1 і T_2 - математичне сподівання часу відмови і часу відновлення відповідно.

Якщо тривалість безвідмовної роботи і тривалість відновлення розподілені по експоненціальним законами, то:

$$k_{\epsilon} = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{\epsilon}(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda}. \quad (8.40)$$

8.3. Закони розподілу, що використовуються в теорії надійності

8.3.1. Нормальний розподіл

Нормальний розподіл є статистичною моделлю для суми великого числа незалежних (або слабо залежних) величин, що мають кінцеві середні і дисперсії, і з високим ступенем точності описує помилку вимірювання. Для опису «часу життя» застосовують нормальне або усічений нормальний розподіл.

Щільність розподілу:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty. \quad (8.41)$$

Функція розподілу:

$$F(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\left(\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} dy, \quad (8.42)$$

де параметри μ і σ ($-\infty < \mu < \infty$; $\sigma > 0$) є параметрами зсуву і масштабу.

Середнє значення: $m_1 = \mu$.

Дисперсія: $m_2 = \sigma^2$.

Коефіцієнт асиметрії: $\gamma_1 = \mu_3 / \sqrt{\mu_2^3} = 0$.

Екссес: $\gamma_3 = \mu_4 / \mu_2^2 - 3 = 0$.

8.3.2. Експонентний розподіл

Постійність інтенсивності відмов робить експоненціальне розподіл особливо важливим в теорії надійності і в її практичних додатках.

Таким чином, з припущення про експонентність розподілу часу безвідмовної роботи витікає, що для оцінок показників надійності досить мати дані лише про сумарний часу напрацювання і про кількість відмов, що відбулися, а інформація про попереднє напрацювання елементів при цьому не є суттєвою.

Щільність розподілу:

$$f_e(x, \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (8.43)$$

Функція розподілу:

$$F_e(x, \lambda) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad (8.44)$$

де λ - інтенсивність відмов ($\lambda > 0$).

Середнє напрацювання до відмови: $m_1 = T_0 = 1/\lambda$.

Дисперсія: $m_2 = 1/\lambda^2$.

Коефіцієнт асиметрії: $\gamma_1 = 2$.

Екссес: $\gamma_3 = 9$.

8.3.3. Розподіл Вейбулла

Розподіл Вейбулла володіє великою різноманітністю форм, його використовують для опису напрацювання до відмови систем з монотонною інтенсивністю потоку відмов.

Щільність розподілу:

$$f_B(x, \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{\lambda}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (8.45)$$

Функція розподілу:

$$F_B(x, \alpha, \beta) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad (8.46)$$

де параметри $\alpha > 0$ і $\beta > 0$ є параметрами масштабу і форми.

Можна записати, що:

- при $\alpha < 1$ інтенсивність відмов (ІВ) убыває, що відповідає періоду тренування або випалювання несправностей;
- при $\alpha > 1$ ІВ зростає - період зносу;
- при $\alpha = 1$ закон Вейбулла приймає форму експонентного закону розподілу, для якого ІВ є постійною, що відповідає періоду нормальної експлуатації.

Контрольні питання

1. Що розуміють під показниками надійності ТС?
2. Як проявляється безвідмовність технічного об'єкту?
3. Чим розрізняється поняття напрацювання для невідновлюваних і відновлюваних технічних об'єктів?
4. Назвіть найбільш важливі показники надійності невідновлюваних об'єктів.
5. В яких формах представляють показники надійності?
6. Чим вимірюється функція ненадійності технічного об'єкту (системи)?
7. Що є щільністю ймовірності відмови технічного об'єкту? Як вона пов'язана з інтенсивністю відмов?
8. Якою є статистична оцінка інтенсивності відмов?
9. Як визначити статистичну оцінку середнього напрацювання до відмови?
10. Поясніть модель функціонування миттєво відновлюваного елемента.

11. Поясніть модель функціонування елементу, відновлюваного за кінцевий час.
12. Як визначити середній час відновлення технічного об'єкту?
13. Що визначає коефіцієнт готовності елемента?
14. Дайте характеристику нормального розподілу і наведіть його параметри.
15. Дайте характеристику експонентного розподілу і наведіть його параметри.
16. Дайте характеристику розподілу Вейбулла і наведіть його параметри.

ТЕМА 9: СТРУКТУРНО - ЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

9.1 Суть структурно-логічного аналізу технічних систем.

9.2 Загальна схема аналізу структурної надійності технічних систем.

9.3 Види з'єднання елементів в технічних системах.

9.1 Суть структурно-логічного аналізу технічних систем

Кінцевою метою розрахунку надійності технічних об'єктів (систем) є оптимізація конструктивних рішень і параметрів, режимів експлуатації, організація технічного обслуговування і ремонтів. Тому вже на ранніх стадіях проектування важливо оцінити надійність об'єкта, виявити найбільш ненадійні вузли і деталі, визначити найбільш ефективні заходи підвищення показників надійності. Вирішення цих завдань можливе після попереднього структурно - логічного аналізу системи.

Технічні й технологічні системи з огляду на їх надійність є складними комплексами, скомпонованими в найрізноманітніших комбінаціях з окремих підсистем та елементів, що відрізняються між собою важливістю показників надійності та їхнім рівнем. Тому задачі визначення показників надійності таких систем є багатоваріантними, але в їх розв'язанні можна відокремити два основних принципи:

Будують структурну схему надійності системи і визначають показники її надійності з урахуванням впливу на ці показники всіх без винятку елементів системи, тобто здійснюють повне визначення надійності;

Будують структурну схему надійності системи і за завчасно заданим критичним рівнем показників надійності елементів виділяють ті з них, що мають низьку надійність, яка є визначальною для системи в цілому. Надійність системи визначають за надійністю цих елементів, тобто розраховують надійність системи за визначальними елементами.

Розчленування ТС на елементи є досить умовним і залежить від постановки задачі розрахунку надійності. Наприклад, при аналізі працездатності технологічної лінії її елементами можуть вважатися окремі установки і агрегати, транспортні і завантажувальні пристрої і т.д. У свою чергу агрегати та пристрої також можуть вважатися технічними системами і при оцінці їх надійності повинні бути розділені на елементи - вузли, блоки, які, в свою чергу - на деталі і т.д.

При визначенні структури ТС в першу чергу необхідно оцінити вплив кожного елемента і його працездатності на працездатність системи в цілому. З цієї точки зору доцільно розділити всі елементи на чотири групи:

1. Елементи, відмова яких практично не впливає на працездатність системи (наприклад, деформація кожуха, зміна забарвлення поверхні і т.п.).

2. Елементи, працездатність яких за час експлуатації практично не змінюється і ймовірність безвідмовної роботи близька до одиниці (корпусні деталі, малонавантажені елементи з великим запасом міцності).

3. Елементи, ремонт або регулювання яких є можливими при роботі або під час планового технічного обслуговування (налагодження і т.д.).

4. Елементи, відмова яких сама по собі або в поєднанні з відмовами інших елементів призводить до відмови системи.

Очевидно, при аналізі надійності ТЗ має сенс включати в розгляд тільки елементи останньої групи.

Для розрахунків параметрів надійності зручно використовувати структурно - логічні схеми надійності ТС, які графічно відображають взаємозв'язок елементів і їх вплив на працездатність системи в цілому. Структурно - логічна схема являє собою сукупність раніше виділених елементів, з'єднаних один з одним послідовно або паралельно. Критерієм для визначення виду з'єднання елементів при побудові схеми є вплив їх відмови на працездатність ТС.

9.2 Загальна схема аналізу структурної надійності технічних систем

В цілому аналіз структурної надійності ТС, як правило, включає наступні операції:

1. Аналізують пристрої та функції, які виконують система та її складові частини а також взаємозв'язок складових частин.

2. Формують зміст поняття "безвідмовної роботи" для даної конкретної системи.

3. Визначають можливі відмови складових частин і системи, їх причини та можливі наслідки.

4. Оцінюють вплив відмов складових частин системи на її працездатність.

5. Систему поділяють на елементи, показники надійності яких відомі.

6. Складають структурно - логічну схему надійності технічної системи, яка є моделлю її безвідмовної роботи.

7. Складаються розрахункові залежності для визначення показників надійності ТС з використанням даних по надійності її елементів і з урахуванням структурної схеми

Залежно від поставленого завдання на підставі результатів розрахунку характеристик надійності ТЗ робляться висновки і приймаються рішення про необхідність зміни або доопрацювання елементної бази, резервування окремих елементів або

вузлів, про встановлення певного режиму профілактичного обслуговування, про нomenclатуру та кількості запасних елементів для ремонту і т.д.

9.3 Види з'єднання елементів в технічних системах

Системи можуть складатися з елементів, які діють послідовно (послідовна система), і з елементів, що діють паралельно (паралельна система, або система з резервуванням). Комбіновані системи можуть мати ділянки з послідовною та паралельною дією елементів.

Послідовним (з точки зору надійності) вважається з'єднання, при якому відмова будь-якого елемента призводить до відмови всієї системи (рис. 9.1 а). Таке поєднання елементів в техніці зустрічається найбільш часто, тому його називають основним з'єднанням.

Паралельним (з точки зору надійності) вважається з'єднання, при якому відмова будь-якого елемента не призводить до відмови системи, поки не відмовлять всі з'єднані елементи (рис. 9.1 б).

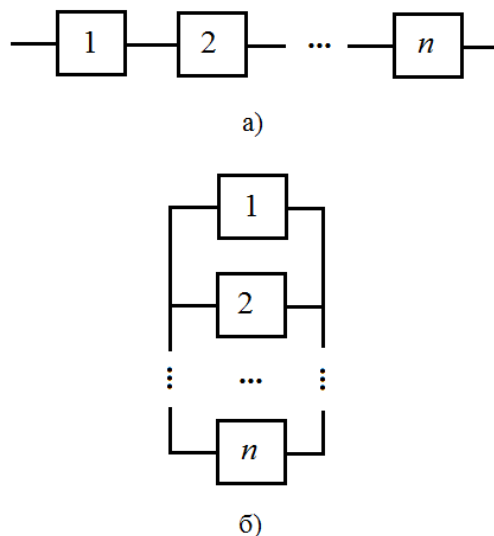


Рисунок 9.1 – Види з'єднання елементів в систему:

а) послідовне;

б) паралельне

Такі схеми надійності характерні для ТС, в яких елементи дублюються або резервуються, тобто паралельне з'єднання використовують як метод підвищення надійності. Однак такі системи зустрічаються і як самостійні.

Більшість реальних ТС має складну **комбіновану** структуру, частина елементів якої утворює послідовне з'єднання, інша частина – паралельне.

Контрольні питання

1. Якою є кінцева мета розрахунку надійності технічного об'єкту?
2. Як побудувати структурну схему надійності системи?
3. Які операції включає аналіз структурної надійності ТС?
4. Які Вам відомі види з'єднання елементів в технічних системах?
5. Яку структуру має більшість реальних ТС?

ТЕМА 10: РОЗРАХУНОК СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ

10.1. Системи з послідовним з'єднанням елементів.

10.2 Системи з паралельним з'єднанням елементів.

10.3 Системи типу " m з n ".

10.4 Мостові схеми.

10.5 Комбіновані системи.

Розрахунки показників безвідмовності ТС звичайно проводяться в припущенні, що як вся система, так і будь-який її елемент можуть перебувати тільки в одному з двох можливих станів - працездатному і непрацездатному і відмови елементів є незалежними один від одного. Стан системи (працездатний або неробочий) визначається станом елементів і їх поєднанням. Тому теоретично можливо розрахунок безвідмовності будь-якої ТС звести до перебору всіх можливих комбінацій станів елементів, визначення ймовірності кожного з них і додаванню ймовірностей працездатних станів системи.

Такий метод (метод прямого перебору) практично є універсальним і може використовуватися при розрахунку будь-яких ТС. Однак при великій кількості елементів системи n такий шлях стає нереальним через великий обсяг обчислень (наприклад, при $n = 10$ число можливих станів системи становить, $2^n = 1024$, при $n = 20$ перевищує 10^6 , при $n = 30$ – є більше, ніж 10^9). Тому на практиці використовують більш ефективні і економічні методи розрахунку, які є не пов'язаними з великим обсягом обчислень. Можливість застосування таких методів пов'язана зі структурою ТС.

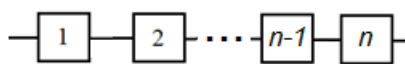
10.1. Системи з послідовним з'єднанням елементів

Системою з послідовним з'єднанням елементів називається система, в якій відмова будь-якого елемента призводить до відмови всієї системи (див. рис 10.1 а).

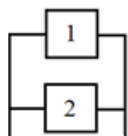
В системі з послідовним з'єднанням для безвідмовної роботи протягом деякого напрацювання t є необхідним і достатнім, щоб кожен з її n елементів працював безвідмовно протягом цього напрацювання. Вважаючи відмови елементів незалежними, ймовірність одночасної безвідмовної роботи n елементів визначається по теоремі множення ймовірностей: ймовірність спільного появи незалежних подій дорівнює добутку ймовірностей цих подій:

$$P(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot \dots \cdot p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)), \quad (10.1)$$

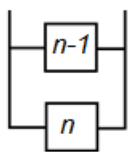
(Далі аргумент t в дужках, що показує залежність показників надійності від часу, будемо опускати для скорочення записів формул).



а)



...



б)

Рисунок 10.1 – З'єднання елементів в систему:

а) послідовне;

б) паралельне

Відповідно, ймовірність відмови такої ТС

$$Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^n p_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i). \quad (10.2)$$

Якщо система складається з елементів, що мають однакову надійність ($p_i = p$), то

$$P = p_i^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n. \quad (10.3)$$

З формул (10.1) - (10.3) є очевидним, що навіть при високій надійності елементів надійність системи при послідовному з'єднанні виявляється тим нижчою, чим більшим є число елементів (наприклад, при $p = 0,95$ і $n = 10$ маємо $P = 0,60$; при $n = 15$ $P = 0,46$, а при $n = 20$ $P = 0,36$). Крім того, оскільки всі співмножники в правій частині виразу (10.1) не перевищують одиниці, ймовірність безвідмовної роботи ТС при послідовному з'єднанні не може бути вище ймовірності безвідмовної роботи

самого ненадійного з її елементів (принцип "гірше гіршого"). З малонадійних елементів не можна створити високонадійну ТС з послідовним з'єднанням.

Якщо всі елементи системи працюють в періоді нормальної експлуатації і має місце найпростіший потік відмов, напрацювання елементів і системи підкоряються експоненціальному розподілу (8.8) і на підставі (10.1) можна записати

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\Lambda t), \quad (10.4)$$

де

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const} \quad (10.5)$$

є інтенсивністю відмов системи.

Таким чином, інтенсивність відмов системи при послідовному з'єднанні елементів і найпростішому потоці відмов дорівнює сумі інтенсивностей відмов елементів. За допомогою виразів (7.8) і (7.9) можуть бути визначені середня і γ - процентне напрацювання.

З (10.4) - (10.5) випливає, що для системи з n елементів з однаковою надійністю ($\lambda_i = \lambda$)

$$\Lambda = n\lambda, \quad T_0 = \frac{T_{0i}}{n}, \quad (10.6)$$

тобто інтенсивність відмов є в n разів більшим, а середнє напрацювання в n разів меншим, ніж у окремого елемента.

10.2 Системи з паралельним з'єднанням елементів

Системою з паралельним з'єднанням елементів називають систему, відмова якої відбувається тільки в разі відмови всіх її елементів (див. рис. 10.1 б).

Для відмови системи з паралельним з'єднанням елементів протягом напрацювання t є необхідним і достатнім, щоб всі її елементи відмовили протягом цього напрацювання. Так що відмова системи полягає в спільному відмові всіх елементів, ймовірність чого (при допущенні незалежності відмов) може бути знайдена по теоремі множення ймовірностей як добуток ймовірностей відмови елементів:

$$Q = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (10.7)$$

Відповідно, ймовірність безвідмовної роботи

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (10.8)$$

Для систем з елементів, які мають однакову надійність ($p_i = p$)

$$Q = q^n, \quad P = 1 - (1 - p)^n, \quad (10.9)$$

тобто надійність системи з паралельним з'єднанням підвищується при збільшенні числа елементів (наприклад, при $p = 0,9$ і $n = 2$ $P = 0,99$; а при $n = 3$ $P = 0,999$).

Оскільки, твір в правій частині (10.7) завжди менше будь-якого із співмножників, тобто ймовірність відмови системи не може бути вище ймовірності найнадійнішого її елемента ("краще кращого") і навіть з порівняно ненадійних елементів можлива побудова цілком надійної системи.

При експонентному розподілі напрацювання (8.8) вираз (10.9) приймає вигляд

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n, \quad (10.10)$$

за допомогою (7.5) після інтегрування і перетворень середнє напрацювання системи визначається

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}, \quad (10.11)$$

де $T_{0i} = 1 / \lambda_i$ – середнє напрацювання елемента.

При великих значеннях n справедлива наближена формула

$$T_0 = T_{0i} (\ln n + \frac{1}{2n} + 0,577). \quad (3.12)$$

Таким чином, середнє напруцювання системи з паралельним з'єднанням більше середнього напруцювання її елементів (наприклад, при $n = 2$ $T_0 = 1,5 \cdot T_{0i}$; при $n = 3$ $T_0 = 1,83 \cdot T_{0i}$).

10.3 Системи типу " m з n "

Систему типу " m з n " можна розглядати як варіант системи з паралельним з'єднанням елементів, відмова якої відбудеться, якщо з n елементів, з'єднаних паралельно, працездатними виявляться менш ніж m елементів ($m < n$).

На рис. 10.1 представлена система "2 з 5", яка є працездатною, якщо з п'яти її елементів працюють будь-які два, три, чотири або всі п'ять (на схемі пунктиром обведені функціонально необхідні два елементи, причому виділення елементів 1 і 2 вироблено умовно, насправді все п'ять елементів є рівнозначними). Системи типу " m з n " найбільш часто зустрічаються в технологічних лініях, а також при структурному резервування (буде розглянуто нижче).

Для розрахунку надійності систем типу " m з n " при порівняно невеликій кількості елементів можна скористатися методом прямого перебору. Він полягає у визначенні працездатності кожного з можливих станів системи, які визначаються різними поєднаннями працездатних і непрацездатних станів елементів.

Всі стани системи "2 з 5" занесені в табл. А.1 Додатку А. (В таблиці працездатні стани елементів і системи відмічені знаком "+", непрацездатні - знаком "-").

Для даної системи працездатність визначається лише кількістю працездатних елементів. По теоремі множення ймовірностей ймовірність будь-якого стану визначається як добуток ймовірностей станів, в яких перебувають елементи.

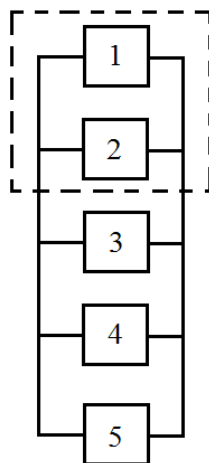


Рисунок 10.1 – Схема система "2 з 5"

Наприклад, в рядку 9 описаний стан системи, в якій відмовили елементи 2 і 5, а інші є працездатними. При цьому умова "2 з 5" виконується, так що система в цілому є працездатною. Імовірність такого стану

$$P_9 = p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 = p^3 q^2.$$

(прийнято, що всі елементи мають однакову надійність). З урахуванням всіх можливих станів ймовірність безвідмовної роботи системи може бути знайдена по теоремі додавання ймовірностей всіх працездатних поєднань. Оскільки в табл. А.1 кількість непрацездатних станів менше, ніж працездатних (відповідно 6 і 26), то є простішим обчислити вірогідність відмови системи. Для цього підсумовують ймовірності непрацездатних станів (де не виконується умова "2 з 5")

$$\begin{aligned} Q &= P_{32} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} = q^5 + 5pq^4 = \\ &= (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5. \end{aligned} \quad (10.13)$$

Тоді ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P = 1 - q = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \quad (10.14)$$

Розрахунок надійності системи " m з n " може проводитися комбінаторним методом, в основі якого лежить формула біноміального розподілу. Біноміальному розподілу підпорядковується дискретна випадкова величина k - число появ деякої події в серії з n випробувань, якщо в окремому випробування ймовірність появи події становить p . При цьому ймовірність появи події рівно k раз визначається

$$P_k = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad (10.15)$$

де C_n^k - біноміальний коефіцієнт, званий "числом сполучень по k з n " (тобто скільки різними способами можна реалізувати ситуацію " k з n ");

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (10.16)$$

Значення біноміальних коефіцієнтів наведені в табл. Б.1 Додатку Б.

Оскільки для відмови системи "m з n" є достатнім, щоб кількість справних елементів було менше m, ймовірність відмови може бути знайдена по теоремі додавання ймовірностей для $k = 0, 1, \dots, (m-1)$:

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} P_k = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (10.17)$$

Аналогічним чином можна знайти ймовірність безвідмовної роботи як суму (10.15) для $k = m, m+1, \dots, n$:

$$P = \sum_{k=m}^n P_k = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (10.18)$$

Очевидно, що $Q + P = 1$, тому в розрахунках слід вибирати ту з формул (10.17), (10.18), яка в даному конкретному випадку містить меншу кількість доданків.

Для системи "2 з 5" (рис. 10.1) за формулою (10.18) отримаємо:

$$P = C_5^2 p^2 (1-p)^3 + C_5^3 p^3 (1-p)^2 + C_5^4 p^4 (1-p) + C_5^5 p^5 = 10p^2(1-p)^3 + 10p^3(1-p)^2 + 5p^4(1-p) + p^5 = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \quad (10.19)$$

Ймовірність відмови тієї ж системи по (10.17):

$$Q = C_5^0 (1-p)^5 + C_5^1 p(1-p)^4 = (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5, \quad (10.20)$$

що, як видно, дає той же результат для ймовірності безвідмовної роботи.

У табл. В.1 Додатку В наведено формули для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи систем типу "m з n" при $m \leq n \leq 5$. Очевидно, при $m = 1$ система перетворюється в звичайну систему з паралельним з'єднанням елементів, а при $m = n$ - з послідовним з'єднанням.

10.4 Мостові схеми

Мостова структура (рис. 10.2, а, б) не зводиться до паралельного або послідовного типу з'єднання елементів, а являє собою паралельне з'єднання послідовних ланцюжків елементів з діагональними елементами, включеними між вузлами різних паралельних гілок (елемент 3 на рис. 10.2, а, елементи 3 і 6 на рис. 3.2, б). Працездатність такої системи визначається не тільки кількістю елементів, які відмовили, але і їх

розташуванням у структурній схемі. Наприклад, працездатність ТС, схему якої приведено на рис. 10.2, а, буде втрачено при одночасній відмові елементів 1 і 2, або 4 і 5, або 2, 3 і 4 і т.д. У той же час відмова елементів 1 і 5, або 2 і 4, або 1, 3 і 4, або 2, 3 і 5 до відмови системи не призводить.

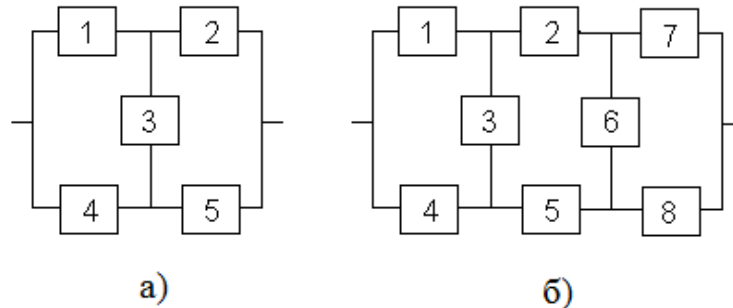


Рисунок 10.2 – Мостові схеми

Таблицю станів мостової схеми наведено у табл. Г.1 Додатку Г.

Для розрахунку надійності мостових систем можна скористатися методом прямого перебору, як це було зроблено для систем "т з n" (п. 10.3), але при аналізі працездатності кожного стану системи необхідно враховувати не тільки число відновлених елементів, але і їх положення в схемі (табл. Г.1). Імовірність безвідмовної роботи системи визначають як суму ймовірностей всіх працездатних станів:

$$\begin{aligned}
 P = & p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + \\
 & + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + \\
 & + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + \\
 & + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5.
 \end{aligned} \quad (10.21)$$

У разі рівнонадійних елементів ($p_i = p$)

$$P = p^5 + 5p^4 \cdot q + 8p^3 \cdot q^2 + 2p^2 \cdot q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2. \quad (10.22)$$

Метод прямого перебору є ефективним тільки при малій кількості елементів n , про що говорилося на початку теми, оскільки число станів системи становить 2^n . Наприклад, для схеми на рис. 10.2, б їх кількість становитиме вже 256. Деяке спрощення досягається, якщо в таблицю станів включати тільки поєднання, що відповідають працездатному (або тільки непрацездатному) стану системи в цілому.

Для аналізу надійності ТС, структурні схеми яких не зводяться до паралельного або послідовного типу, можна скористатися також методом логічних схем із

застосуванням алгебри логіки (булевої алгебри). Застосування цього методу зводиться до складання для ТС формули алгебри логіки, яка визначає умови працездатності системи. При цьому для кожного елементу і системи в цілому розглядаються дві протилежних події - відмова і збереження працездатності.

Для складання логічної схеми можна скористатися двома методами - мінімальних шляхів і мінімальних перетинів.

Розглянемо метод мінімальних шляхів для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи на прикладі мостової схеми (рис. 10.2, а).

Мінімальним шляхом називають послідовний набір працездатних елементів системи, який забезпечує її працездатність, а відмова будь-якого з них призводить до її відмови.

Мінімальних шляхів у системі може бути один або декілька. Очевидно, система з послідовним з'єднанням елементів (рис. 10.1 а) має тільки один мінімальний шлях, що включає всі елементи. В системі з паралельним з'єднанням (рис. 10.1 б) число мінімальних шляхів збігається з числом елементів і кожен шлях включає один з них.

Для мостової системи з п'яти елементів (рис. 10.2, а) мінімальних шляхів є чотири: (елементи 1 і 4), (2 і 5), (1, 3 і 5), (2, 3 і 5). Логічна схема такої системи (рис. 10.3) складається таким чином, щоб всі елементи кожного мінімального шляху були з'єднані один з одним послідовно, а все мінімальні шляхи паралельно.

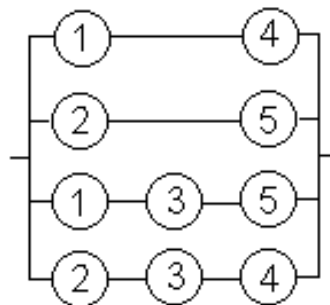


Рисунок 10.3 – Логічна схема мостової системи за методом мінімальних шляхів

Потім для логічної схеми складають функцію алгебри логіки A за загальними правилами розрахунку ймовірності безвідмовної роботи, але замість символів ймовірностей безвідмовної роботи елементів p_i і системи P використовують символи події (збереження працездатності елемента a_i і системи A). Так, "відмова" логічної схеми рис. 10.3 має на увазі одночасну відмову всіх чотирьох паралельних гілок, а "безвідмовна робота" кожної гілки - одночасну безвідмовну роботу її елементів. Послідовне з'єднання елементів логічної схеми відповідає логічному множенню ("І"),

паралельне - логічному складанню ("АБО"). Отже, схема рис. 10.3 відповідає твердженням: система є працездатною, якщо працездатними є елементи 1 і 4, або 2 і 5, або 1, 3 і 5, або 2, 3 і 4. Функція алгебри логіки запишеться:

$$A = 1 - (1 - a_1 \cdot a_4)(1 - a_2 \cdot a_5)(1 - a_1 \cdot a_3 \cdot a_5)(1 - a_2 \cdot a_3 \cdot a_4). \quad (10.23)$$

У виразі (10.23) змінні a розглядають як булеві, тобто вони можуть приймати тільки два значення: 0 або 1. Тоді при зведенні в будь-яку ступінь k будь-яка змінна a зберігає своє значення: $a_i^k = a_i$. На основі цієї властивості функція алгебри логіки (10.23) може бути перетворена до виду

$$\begin{aligned} A = & a_1 \cdot a_4 + a_2 \cdot a_5 + a_1 \cdot a_3 \cdot a_5 + a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 - a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 - \\ & - a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_5 - 2a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_5 - a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 + 2a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5. \end{aligned} \quad (10.24)$$

Замінивши у виразі (10.24) символи подій їх ймовірностями, отримаємо рівняння для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи

$$\begin{aligned} P = & p_1 \cdot p_4 + p_2 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_3 \cdot p_5 + p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 - \\ & - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_5 - 2p_1 \cdot p_2 \cdot p_4 \cdot p_5 - p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + 2p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5. \end{aligned} \quad (10.25)$$

Для системи рівнонадійних елементів ($p_i = p$) вираз (10.25) легко перетворюється в формулу (10.22).

Метод мінімальних шляхів дає точне значення тільки для порівняно простих систем з невеликим числом елементів. Для більш складних систем результатом розрахунку є нижня межа ймовірності безвідмовної роботи.

Для розрахунку верхньої межі ймовірності безвідмовної роботи системи служить метод **мінімальних перерізів**.

Мінімальним перерізом називають набір непрацездатних елементів, відмова яких призводить до відмови системи, а відновлення працездатності будь-якого з них - до відновлення працездатності системи. Як і мінімальних шляхів, мінімальних перерізів може бути кілька. Очевидно, система з паралельним з'єднанням елементів має тільки один мінімальний переріз, що включає всі її елементи (відновлення будь-якого відновить працездатність системи). В системі з послідовним з'єднанням елементів число мінімальних шляхів збігається з числом елементів, і кожний переріз включає один з них.

У мостовій системі (рис. 10.2, а) мінімальних перерізів є чотири (елементи 1 і 2), (4 і 5), (1, 3 і 5), (2, 3 і 4). Логічна схема системи (рис.10.4) складається

таким чином, щоб всі елементи кожного мінімального перерізу були з'єднані один з одним паралельно, а всі мінімальні перерізи - послідовно. Аналогічно методу мінімальних шляхів, складають функцію алгебри логіки. "Безвідмовна робота" логічної системи рис. 10.4 полягає в "безвідмовній роботі" всіх послідовних ділянок, а "відмова" кожного з них - в одночасній "відмові" всіх паралельно включених елементів. Як видно, оскільки схема методу мінімальних перерізів формулює умови відмови системи, в ній послідовне з'єднання відповідає логічному "АБО", а паралельне - логічному "І". Схема рис. 10.4 відповідає формулюванню: система відмовить, якщо відмовлять елементи 1 і 2, або 4 і 5, або 1, 3 і 5, або 2, 3 і 4. Функція алгебри логіки запишеться

$$A = [1 - (1 - a_1)(1 - a_2)][1 - (1 - a_4)(1 - a_5)] * [1 - (1 - a_1)(1 - a_3)(1 - a_5)] * [1 - (1 - a_2)(1 - a_3)(1 - a_4)]. \quad (10.26)$$

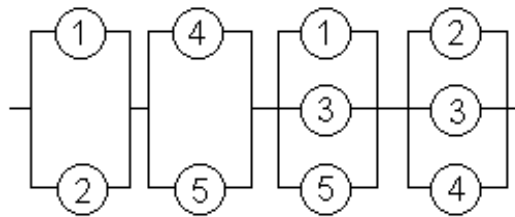


Рисунок 10.4 – Логічна схема мостової системи за методом мінімальних перерізів

Після перетворень з використанням властивостей булевих змінних (10.26) набуває форму (10.24), після заміни подій їх ймовірностями переходить у вираз (10.25).

Таким чином, для мостової системи з п'яти елементів верхня і нижня межі ймовірності безвідмовної роботи, отримані методами мінімальних перетинів і мінімальних шляхів, збіглися з точними значеннями (10.22), отриманими методом прямого перебору. Для складних систем це може не відбутися, тому методи мінімальних шляхів і мінімальних перетинів слід застосовувати спільно.

У ряді випадків аналізу надійності ТС вдається скористатися методом розкладання щодо особливого елемента, заснованими на відомій в математичній логіці теоремі про розкладанні функції логіки з будь-якого аргументу. Відповідно до неї, можна записати:

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0), \quad (10.27)$$

де p_i і $q_i = 1 - p_i$ - ймовірності безвідмовної роботи і відмови i - го елементу;
 $P(p_i = 1)$ і $P(p_i = 0)$ - ймовірність працездатного стану системи за умови, що i - й елемент є абсолютно надійним і що i - й елемент відмовив.

Для мостової схеми (рис. 10.2, а) як особливий елемент доцільно вибрати діагональний елемент 3. При $p_3 = 1$ мостова схема перетворюється в паралельно - послідовне з'єднання (рис. 10.5, а), а при $p_3 = 0$ - в послідовно - паралельне (рис. 10.5, б).

Для перетворених схем можна записати:

$$P(p_3 = 1) = [1 - (1 - p_3)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)], \quad (10.28)$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 \cdot p_4)(1 - p_2 \cdot p_5). \quad (10.29)$$

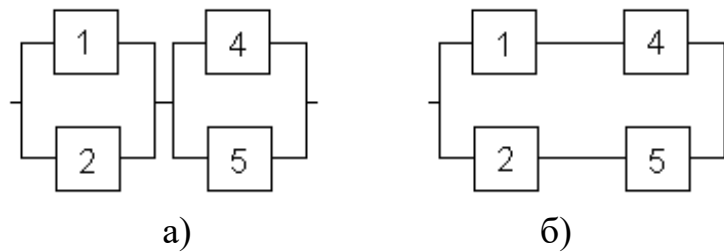


Рисунок 10.5 – Перетворення мостової схеми при
а) абсолютно надійному центральному елементі;
б) при його відмові

Тоді на підставі формули (10.27) отримаємо:

$$P = p_3 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)] + (1 - p_3) [1 - (1 - p_1 \cdot p_4)(1 - p_2 \cdot p_5)]. \quad (10.30)$$

Легко переконатися, що для рівнонадійних елементів формула (10.30) зветься в (10.22).

Цим методом можна скористатися і при розкладанні щодо кількох "особливих" елементів. Наприклад, для двох елементів (i, j) вираз (10.27) набуде вигляду:

$$P = p_i \cdot p_j \cdot P(p_i = 1, p_j = 1) + p_i \cdot q_j \cdot P(p_i = 1, p_j = 0) + q_i \cdot p_j \cdot P(p_i = 0, p_j = 1) + q_i \cdot q_j \cdot P(p_i = 0, p_j = 0). \quad (10.31)$$

Імовірність безвідмовної роботи мостової схеми (рис. 10.2, б) при розкладанні щодо діагональних елементів 3 і 6 по (10.31) визначається:

$$P = p_3 \cdot p_6 \cdot P(p_3 = 1, p_6 = 1) + p_3 \cdot q_6 \cdot P(p_3 = 1, p_6 = 0) + q_3 \cdot p_6 \cdot P(p_3 = 0, p_6 = 1) + q_3 \cdot q_6 \cdot P(p_3 = 0, p_6 = 0). \quad (10.32)$$

Ймовірності легко представити, виконавши попередньо перетворення схеми, подібно рис. 10.5, а, б.

10.5. Комбіновані системи

Більшість реальних ТС має складну комбіновану структуру, частина елементів якої утворює послідовне з'єднання, інша частина - паралельне, окремі гілки елементи або гілки структури утворюють мостові схеми або типу "m з n".

Реалізація методу прямого перебору для таких систем виявляється складною задачею. Більш доцільно в цих випадках попередньо зробити декомпозицію системи, розбивши її на прості підсистеми - групи елементів, методика розрахунку надійності яких є відомою. Потім ці підсистеми в структурній схемі надійності замінюють квазіелементом з вірогідністю безвідмовної роботи, рівними обчисленим ймовірностям безвідмовної роботи цих підсистем. При необхідності таку процедуру можна виконати кілька разів, до тих пір, поки квазіелементи, що залишилися, не утворять структуру, методика розрахунку надійності якої також є відомою.

Як приклад розглянемо комбіновану систему, представлену на рис. 10.6. Тут елементи 2 і 5, 4 і 7, 9 і 12, 11 і 14 попарно утворюють один з одним послідовні з'єднання. Замінімо їх відповідно квазіелементами A , B , C , D , для яких розрахунок надійності елементарно виконується за формулами п. 10.1. Елементи 15, 16, 17 і 18 утворюють паралельне з'єднання (див. п. 10.2), а елементи 3, 6, 8, 10 і 13 - систему "3 з 5" (див. п. 10.3). Відповідні квазіелементи позначимо E і F . У результаті перетворена схема набуде вигляду, показаного на рис. 10.7, а. В ній у свою чергу елементи A , B , C , D , F утворюють мостову схему (п. 10.4), яку можна замінити квазіелементом G .

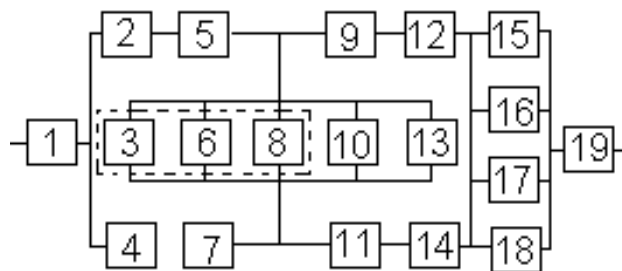
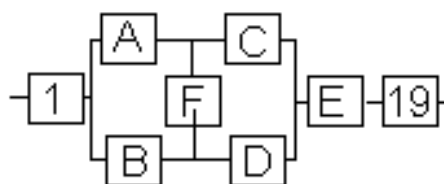


Рисунок 10.6 – Вихідна комбінована система



a)



б)

Рисунок 10.7 – Перетворені системи

Схема, отримана після таких перетворень (див. рис. 10.7, б), утворює послідовне з'єднання елементів 1, G, E, 19, для яких є справедливими співвідношення п. 10.1. Відзначимо, що метод прямого перебору для вихідної системи зажадав б розглянути $2^{19} = 524288$ можливих станів.

Контрольні питання

1. За якими припущеннями звичайно проводять розрахунки показників безвідмовності ТС?
2. Як здійснити розрахунок безвідмовності ТС перебором всіх можливих комбінацій станів елементів?
3. Яка умова є необхідною і достатньою для безвідмовної роботи протягом деякого напрацювання системи з послідовним і системи в паралельним з'єднанням елементів?
4. Як визначити інтенсивність відмов системи з послідовним з'єднанням елементів?

5. Як визначити ймовірність безвідмовної роботи системи, яка складається з елементів, які мають однакову надійність?
6. Дайте характеристику системи типу " m з n ".
7. Як розрахувати надійності системи " m з n " комбінаторним методом?
8. Чим визначається працездатність системи, яка має мостову структуру?
9. Як визначити мінімальний шлях мостової схеми?
10. Поясніть використання методу перерізів для розрахунку верхньої межі ймовірності безвідмовної роботи системи.
11. В який спосіб зазвичай проводять аналіз безвідмовної роботи комбінованих систем?

ТЕМА 11: ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ТЕХНІЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

11.1 Технічні і технологічні системи як об'єкти забезпечення надійності і довговічності.

11.2 Класифікація методів підвищення і підтримки надійності систем.

11.3 Методи підвищення надійності, що застосовуються при проектуванні.

11.4 Методи підвищення надійності, що застосовуються при виготовленні.

11.5 Методи підтримки надійності, що застосовуються при експлуатації.

11.1 Технічні і технологічні системи як об'єкти забезпечення надійності і довговічності

Як відомо, *технічна система (ТС)* є сукупністю об'єктів, які спільно взаємодіють і призначених для виконання заданих функцій. Система може охоплювати різні сукупності об'єктів. Як ТС можна розглядати автоматичну систему керування технологічним процесом (АСК ТП), диспетчерський пункт, газоперекачувальний агрегат, компресор, холодильник, дифузійний апарат, комп'ютер або один із його периферійних пристроїв тощо.

У техніці широко застосовують також поняття *технологічна система*. Це сукупність функціонально взаємопов'язаних засобів технологічного оснащення, предметів виробництва та виконавців для виконання в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів або операцій.

Систему, що відокремлюють за функціональною або структурною ознакою з технологічної системи вищого рівня, називають *підсистемою* технологічної системи.

Теорія надійності розглядає послідовні, паралельні й комбіновані ТС. Існують системи з жорстким зв'язком підсистем, в якій вихід з ладу хоча б однієї підсистеми призводить до припинення функціонування ТС в цілому. Альтернативою такій системі є ТС з нежорстким зв'язком підсистем.

У нафтотранспортній системі, наприклад, відмова одного з нафтопроводів не спричинює припинення функціонування його в цілому (система з нежорстким зв'язком підсистем).

Об'єкти, що утворюють системи, є елементами систем. У теорії надійності під *елементом* розуміють частину системи, що має самостійну характеристику надійності, яку використовують у розрахунках, та яка виконує певну часткову функцію для забезпечення роботи системи. Елементами системи можуть бути, наприклад, виконавчий механізм, запам'ятовувальний пристрій ЕОМ, деталь агрегату.

Система й елементи – поняття умовні. Те, що вважають системою в одній задачі надійності, може сприйматися як елемент в іншій. Навіть таку складну систему, як автоматизовану систему управління технологічним процесом (АСУ ТП), можна розглядати як складовий елемент системи – автоматизованого технологічного комплексу, до складу якого крім АСК ТП входить технологічний об’єкт керування (сукупність технологічного обладнання та реалізованого на ньому технологічного процесу виробництва).

Характеристики надійності елементів визначають у результаті аналізу фізичних процесів, при проведенні випробувань або з досвіду експлуатації. Характеристики надійності системи в цілому визначають з характеристик надійності елементів, що утворюють цю систему.

11.2 Класифікація методів підвищення і підтримки надійності систем

Кожний технічний об’єкт нафтогазової галузі як вид продукції практичного використання має такі періоди існування: *проектування, виробництво і експлуатацію*. Проблеми надійності технічних виробів у кожному з названих періодів мають свої особливості й розв’язуються по-різному. В період проектування рівень надійності виробів закладається, при їх виробництві — забезпечується, а при експлуатації — підтримується. Заходи, що визначають надійність виробів у кожному з періодів існування, поділяють на *загальні (стратегічні) і часткові (тактичні)*.

Всі методи підвищення і підтримки надійності розбивають на три великі групи: методи, що застосовуються при проектуванні, при виготовленні і при експлуатації.

11.3 Методи підвищення надійності, що застосовуються при проектуванні

До таких методів належать:

- 1) резервування;
- 2) спрощення системи;
- 3) вибір найбільш надійних елементів;
- 4) створення схем з обмеженими наслідками відмов елементів;
- 5) полегшення електричних, механічних, теплових та інших режимів роботи елементів;
- 6) стандартизація та уніфікація елементів і вузлів;
- 7) вбудований контроль;
- 8) автоматизація перевірок.

Ефективність цих методів полягає в тому, що вони дозволяють з малонадійних елементів будувати надійні системи. Ці методи дозволяють зменшити інтенсивність відмов системи, зменшити середній час відновлення і час безперервної роботи системи.

У період проектування майбутня надійність технічних виробів залежить насамперед від загального рівня розвитку галузі, в якій проектують вироби, від ефективного застосування в ній загальних організаційно-технічних заходів з підвищення надійності, тобто від того, як підтримуються добрі традиції проектного колективу, кваліфікація персоналу, його досвід і знання галузі, для якої ведеться проектування, від роботи інформаційних служб, ефективності прямих і зворотних зв'язків з виробниками і експлуатаційниками. Тому в будь-якому проектному колективі підбір кадрів і підвищення їх кваліфікації, збагачення інформаційних банків є стратегічною гарантією забезпечення якості створюваного обладнання і передусім його надійності.

Основою для прогнозування надійності проєктованих об'єктів (систем) в цей період є розрахунки, порівняння з відомими аналогами, іноді експертна оцінка. Проєкт розробляють за кілька стадій. Потрібний рівень надійності вибирають уже на першій стадії розроблення *технічного завдання* (ТЗ), виходячи з вимог до ТС в експлуатації і технічних можливостей виробника системи. На стадії розроблення ТЗ орієнтуються на показники надійності відомих аналогів, віддаючи перевагу найбільш вдалим. У подальших розробках вибраний рівень надійності стає показником, якого треба досягти або перевищити.

На стадії створення *ескізного проєкту* проводять перші інженерні розрахунки, у тому числі на динамічні навантаження та на міцність. Від якості цих розрахунків значною мірою залежить надійність ТС. Паралельно з'являється можливість аналізувати структурні схеми надійності й виконувати попередні розрахунки її показників. Це дає змогу обґрунтовувати вибір надійних комплектуючих елементів, перевірених вузлів і конструкцій, які запозичуються з інших систем.

Розрахунки для прогнозування надійності технічних об'єктів (систем) ґрунтуються на використанні відомих показників надійності елементів. Ці показники є переважно середньостатистичними і не враховують конкретних умов функціонування елементів. Розрахунки показників надійності елементів, які доводять до порівняння за окремими критеріями розрахункових параметрів y з їх граничними величинами $y_{дон}$, дають точніші результати. Параметр y завжди можна подати функцією, яку в загальному вигляді можна зобразити рівнянням

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (11.1)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_n$ — випадкові чинники.

Граничні значення параметрів можна визначати за таким самим рівнянням, або вибирати за нормативами чи довідниковими даними. Іноді їх установлюють випробуваннями.

Дієздатність елемента за вибраними критеріями забезпечується, коли розрахунковий параметр не перевищує його граничного значення. У класичних розрахунках використовують *коефіцієнт запасу* n . Умови розрахунків вибирають залежно від напрямку зміни параметрів, від яких погіршуються умови роботи елемента:

$$y \leq y_{\text{дон}} \cdot n \quad \text{або} \quad y \geq y_{\text{дон}} \cdot n. \quad (11.2)$$

Розрахунок виконують для найнесприятливіших умов, тому дійсне значення коефіцієнта запасу n залишається невідомим.

У розрахунках, що ґрунтуються на визначенні ймовірності подій, y і $y_{\text{дон}}$ розглядають як випадкові величини, а мірою надійності є ймовірність безвідмовної роботи P елемента за заданим критерієм. Тоді розрахункову умову забезпечення ймовірності P безвідмовної роботи елемента визначають за рівнянням

$$\bar{y} - \bar{y}_{\text{дон}} = U_p S, \quad (11.3)$$

де $\bar{y}$, $\bar{y}_{\text{дон}}$ — відповідно середнє і середнє допустиме значення параметра $y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$;
 U_p — квантиль¹ нормального нормованого розподілу;

$$S = \sqrt{S_y^2 + S_{y_{\text{дон}}}^2} \quad (11.4)$$

S , S_y і $S_{y_{\text{дон}}}$ — середньоквадратичне відхилення відповідно суми двох випадкових величин, значення параметра і допустимого значення параметра $y_{\text{дон}}$.

Середньоквадратичне S_y відхилення розраховують так:

$$S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{df(x)}{dx_i} \right)^2 S_i^2} \quad (11.5)$$

¹ **Квантиль** — одна з числових характеристик випадкових величин, що застосовується в математичній статистиці. Квантилі відсікають в межах ряду певну частину його членів. Тобто, квантиль (термін використаний вперше Кендалом в 1940 р.) розподілення значень — це таке число x_p , що значення p -ї частини сукупності менше або рівне x_p . Наприклад, квантиль 0,25 (також називається 25-м процентилем або нижнім квантилем) змінної — це таке значення (x_p), що 25% (p) значень змінної попадають нижче даного значення

де $\frac{df(x)}{dx_i}$ — похідна функції $f(x)$ по чиннику x_i , в яку підставляють середні значення $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$;

N — кількість досліджуваних зразків.

Кількісні характеристики розподілу випадкових чинників $\bar{x}_i$ і S_i вибирають за довідниковими даними, а в деяких випадках за результатами спеціальних експериментів. Їх можна визначити також за граничними значеннями чинників:

$$\bar{x}_i = \frac{x_{i \max} + x_{i \min}}{2}; \quad (11.6)$$

$$S_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{d}, \quad (11.7)$$

де d — коефіцієнт, що залежить від кількості випробувань N і береться з такого ряду:

N	2	5	10	15	20	30	50	100
d	1,13	2,3	3,1	3,5	3,7	4,1	4,5	5,0

Для чинників з нормальним законом розподілу, граничні значення яких нормуються (наприклад, технологічні допуски), S_i можна визначити за формулою

$$S_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{6}.$$

Це відповідає ймовірності $P(t)$ знаходження значення чинника в допустимих межах, що дорівнює 0,997. За інших значень P справедливим є такий вираз:

$$S_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{2U_p}, \quad (11.8)$$

де $2U_p$ вибирають із такого ряду:

P	0,9	0,95	0,98	0,99	0,995	0,999
$2U_p$	3,29	3,92	4,66	5,16	5,62	6,38

Припустимо, що різниця $y - y_{\text{дон}}$ має нормальний розподіл, який буває лише за нормального розподілу величин y і $y_{\text{дон}}$. У цьому разі ймовірність $P(t)=0,5$ забезпечується при $\bar{y} - \bar{y}_{\text{дон}} = 0$. Імовірність безвідмовної роботи елемента можна знайти за таблицею залежності між U_p і $P(t)$ за значенням U_p , визначеним за рівнянням

$$U_p = -\frac{\bar{y}_{\text{дон}} - \bar{y}}{\sqrt{S_{y_{\text{дон}}}^2 + S_y^2}} \quad (11.9)$$

Поділивши чисельник і знаменник на $\bar{y}$ і ввівши коефіцієнт варіації

$$V_y = \frac{S_y}{\bar{y}} \quad \text{і} \quad V_{y_{\text{дон}}} = \frac{S_{y_{\text{дон}}}}{\bar{y}_{\text{дон}}}, \quad (11.10)$$

знайдемо залежність між U_p і коефіцієнтом запасу $\bar{n}$ за розрахунковим параметром

$$U_p = -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 V_{y_{\text{дон}}}^2 + V_y^2}}. \quad (11.11)$$

За ескізним проектом виготовляють експериментальні зразки технічних об'єктів (систем) для випробувань або пробної експлуатації, де навантаження та інші експлуатаційні чинники, що впливають на надійність, можна перевірити. Випробування або пробна експлуатація експериментальних зразків дають перші статистичні дані для наближеної оцінки показників надійності. На цій основі коригують і розрахунки і вдосконалюють конструкцію об'єкту на стадії розроблення *технічного проекту*.

За результатами випробувань дослідних зразків і установчої серії технічних об'єктів як виробів, виготовлених за технічним проектом, уточнюють кількісні та якісні вимоги до надійності, формулюють вимоги до періодичності й обсягу випробувань на надійність при серійному виробництві, розробляють систему технічного обслуговування і ремонту для підтримування надійності в процесі експлуатації. Таким чином створюють *робочий проект* технічної системи і передають на виробництво.

Удосконалювати проект можна також під час серійного виробництва технічних об'єктів. Отже, процес проектування технічних об'єктів (систем) об'єднує чотири стадії: технічне завдання (ТЗ) на проектування, ескізний проект, технічний проект і робочий проект. Багато технічних об'єктів харчових і переробних виробництв проходить не всі з названих стадій проектування, що обмежує можливості в оцінюванні їх надійності в період розроблення. Це стосується здебільшого великогабаритного потужного обладнання, яке експлуатується з перших зразків. Для визначення показників надійності такого обладнання використовують тільки *підконтрольну експлуатацію*, яка також не завжди реалізується. Тому надійність цих технічних об'єктів (систем) при проектуванні забезпечується переважно за рахунок якості проектних робіт і зв'язків проектувальників з виробничниками і експлуатаційниками.

Під час кожної стадії проектування виконують конкретні конструктивні заходи (прийоми) щодо забезпечення надійності ТС. Вирішальне значення для забезпечення надійності має правильний вибір принципу дії обладнання з урахуванням усіх фізичних та хімічних явищ, що є основою технологічних процесів за участю цього обладнання. Заміна механічних процесів на процеси іншого принципу дії (пневматика, магнетизм, біохімічні, гідравлічні тощо) може сприяти підвищенню показників надійності на порядок.

Окрім розрахунків на міцність, стійкість і спрацювання, при проектуванні технічних об'єктів (систем) обґрунтовують вибір різних виконавчих систем, раціонально підбирають матеріали деталей з урахуванням умов їхньої роботи: агресивності складу і температури середовища, динамічних навантажень, наявності збудників вібрацій тощо. До обладнання підприємств нафтогазової галузі висуваються специфічні вимоги, які мають враховувати при проектуванні, адже важкі умови експлуатації спричиняють його підвищене спрацювання і корозійне руйнування. У більшості випадків лімітуючими (з погляду надійності) є вузли тертя і деталі, поверхні яких контактують з агресивними технологічними середовищами. Проблеми надійності цих деталей і вузлів розв'язуються за рахунок обґрунтованого вибору матеріалів і захисних покриттів. Використовують також конструктивний захист деталей від середовищ. Для цього призначені сальники, захисні щити, ізолятори, відводи для середовищ та інші засоби. Надійно працюють вузли тертя з ізольованими, автономними системами змащування. Затрати, спричинені подібним ускладненням конструкції технічного об'єкту (системи), з надлишком компенсуються під час їх експлуатації.

Для зниження навантаженості деталей і вузлів удаються до розподілення навантажень. Наприклад, використовують пристрої, що забезпечують рівномірність подавання вуглеводнів на технологічні лінії, поділ транспортного потоку на кілька ліній.

Відчутного пошкодження обладнанню нафтогазової галузі завдає корозія. Основним конструктивним заходом для боротьби з нею є прилади електрохімзахисту.

Одним із ефективних засобів захисту обладнання від корозії є установа протекторів з активнішого металу, які змінюють електродний потенціал металевих деталей.

До конструктивних заходів щодо забезпечення надійності технічних об'єктів (систем) належить також спрощення конструкцій для забезпечення легкого монтажу і монтажу вузлів при виявленні елементів, що відмовили, і під час виконання ремонтних операцій. Перспективними вважають конструкції у вигляді агрегатів, які у разі відмови повністю можна було б замінити новими або відремонтованими. Агрегати ж, що відмовили, можуть ремонтуватись автономно і не обмежувати використання технічних об'єктів. Наведені конструктивні заходи узагальнюють таким чином: *підпорядкування конструкції технічного об'єкту існуючій системі обслуговування і ремонту обладнання в нафтогазовій галузі.*

При проектуванні задається також система контролю і необхідних вимірювань параметрів ТС під час виробництва з тим, щоб гарантувати їх якість.

11.4 Методи підвищення надійності, що застосовуються при виготовленні

При виготовленні елементів, систем надійність можна підвищити, удосконалюючи технологію виробництва, здійснюючи автоматизацію виробничих процесів, застосовуючи статистичний контроль якості продукції, здійснюючи тренування елементів і систем. Всі ці методи дозволяють зменшити інтенсивність відмов елементів системи.

У сфері виробництва ТС відокремлюють стратегічні й тактичні засоби забезпечення їх надійності. До *стратегічних* належать такі самі засоби, як і при проектуванні: підтримка належного науково-технічного рівня виробництва, у тому числі оснащення, підготовка й підвищення кваліфікації інженерно-технічних і виробничих кадрів, підвищення рівня інформованості, забезпечення прямих і зворотних зв'язків з проектувальниками та експлуатаційниками. Крім того, у виробничій сфері велике значення для забезпечення бажаної надійності технічних об'єктів мають організація і культура виробництва та рівень технологічної дисципліни. Щоб забезпечити надійність своєї продукції, на машинобудівних підприємствах здійснюють вхідний контроль комплектуючих на відповідність технічним вимогам. Для цього призначена також система контролю власного виробництва, приймання і випробування готових технічних об'єктів.

До *тактичних* засобів підвищення надійності належать зміцнення і поліпшення матеріалу деталей методами термічної, хіміко-термічної, термодифузійної та інших видів обробки; зняття внутрішньої напруженості кованих, литих, термооброблених деталей за рахунок відпалювання, старіння або відпускання; якісне виконання

фінішних операцій (шліфування, хонінгування, полірування, вигладжування); заміна різання пластичною деформацією при формуванні деталей (наприклад, накатування різьби, галтелей і переходів на валах та інших ступінчастих важконавантажених деталях). Пластична деформація сприяє зміцненню деталей або їх поверхні, оскільки в деформованому металі зникають дефекти, що виникли під час попередніх процесів обробки, а при деформації волокна структури набирають форму готових деталей (наприклад, при куванні заготовок колінчастих валів) і надають більшої міцності. Зміцнення деталей пластичною деформацією можна досягти, якщо внутрішню напруженість, що з'являється між деформованим шаром і основною структурою, протиставити діючому навантаженню. Несуча здатність деталей підвищується саме завдяки такому протиставленню зусиль пружної деформації діючим зовнішнім силам.

11.5 Методи підтримки надійності, що застосовуються при експлуатації

Підвищити надійність системи в процесі її експлуатації надзвичайно важко. Це пояснюється тим, що надійність системи в основному закладається при її проектуванні, забезпечується при виготовленні, а при експлуатації надійність тільки витрачається її витрати залежить від методів експлуатації, кваліфікації обслуговуючого персоналу, умов експлуатації.

Завдання інженерів-експлуатаційників полягає не в підвищенні надійності системи, а в тому, щоб якомога довше зберегти надійність системи, закладену в процесі її проектування і виготовлення.

Наукові методи експлуатації включають в себе науково обґрунтовані способи проведення профілактичних заходів і ремонтів. Сюди в першу чергу відносяться частота і глибина перевірок, умови зберігання, регламентація часу безперервної роботи системи і т.п.

Слід, однак, відзначити, що в процесі експлуатації не тільки витрачається надійність. При правильній організації експлуатації також вдається підвищити надійність систем. Дійсно, якщо профілактичні заходи попереджають відмови, то це аналогічно зменшенню інтенсивності відмов системи. Різниця полягає лише в тому, що тут надійність елементів практично не підвищується, як це має місце при проектуванні і виготовленні, а своєчасно відбувається зміна або ремонт ще не відмовили елементів, але таких, ймовірність відмов яких сильно зросла.

Умови експлуатації дуже сильно впливають на проектування і виготовлення знов розроблюваної системи. Це пояснюється тим, що дані про відмови елементів, систем, отримані при її експлуатації, повністю характеризує її надійність і тому є часто вихідними даними при проектуванні високонадійних систем.

Експлуатація - це свого роду експеримент з реальними умовами роботи систем, який не може бути проведений в жодній лабораторії. Тому збір, наукова обробка і узагальнення статистичних даних про відмови елементів, систем є однією з важливих функцій технічної експлуатації.

Досвід експлуатації завжди має використовуватися при проектуванні і виготовленні надійних систем, а результати проектування і виготовлення - при вдосконаленні методів експлуатації.

У сучасних складних технічних системах (газоперекачувальних агрегатах, насосах, двигунах та ін.) передбачені спеціальні давачі і системи контролю, які дають змогу вимірювати основні параметри (тиск оливи, температуру, зусилля тощо) і контролювати працездатність окремих елементів і механізмів. Така постійна технічна діагностика необхідна для забезпечення раціональних умов експлуатації і підвищення надійності ТС.

Працездатність технічних об'єктів у разі відмови їхніх елементів і зниження характеристик відновлюють у період ремонтів. Для виконання всього комплексу ремонтних робіт розробляють спеціальну систему, яка відображає специфіку й умови роботи машин і апаратів конкретного типу. Добре зарекомендувала себе система планово-попереджувальних ремонтів (ППР), яку вперше запровадили в авіації, автомобілебудуванні й під час ремонтів металорізальних верстатів. Типова система ППР мала дев'ять періодів зі структурою ремонтного циклу I–I–II–I–I–II–I–I–III (або M–M–C–M–M–C–M–M–K), де I(M) – малий ремонт, II(C) – середній, III(K) – капітальний.

Нині систему ППР широко застосовують на підприємствах нафтогазової галузі. Нормативні матеріали щодо системи ППР розроблено практично в усіх галузях промисловості. Вони охоплюють статистичні дані, формули і правила встановлення обсягу ремонтних робіт і терміну міжремонтного періоду для кожного конкретного випадку. При створенні будь-якої ремонтної системи потрібно виходити з умови забезпечення високого рівня надійності й довговічності технічного об'єкта.

Міжремонтний період (T_1) є основним параметром системи ППР, який відображає специфіку конкретного обладнання, характер його навантаження й експлуатації.

Міжремонтний період можна вважати оптимальним ($T_1 = T_{opt}$), якщо встановлюється таке співвідношення між обсягами робіт під час періодичних ремонтів і міжремонтного обслуговування, яке забезпечує мінімальну трудомісткість ремонту для певних умов.

При збільшенні міжремонтного періоду велику кількість деталей ремонтують при міжремонтному обслуговуванні. Це призводить з одного боку, до повнішого використання термінів експлуатації окремих деталей, а з іншого, до збільшення обсягу збірно-розбірних робіт. Зважаючи на це, професор О. С. Проніков запропонував таку формулу для визначення оптимального міжремонтного періоду:

$$T_{omt} = \frac{1,8}{k} \left(\frac{\tau_k}{\tau_1} + 1 \right) (\beta - \sqrt{\beta^2 - 1}) T_\phi, \quad (11.12)$$

де k – кількість ремонтів у циклі ($k = 6$ або $k = 9$);

τ_k – трудомісткість капітального ремонту;

τ_1 – трудомісткість малого ремонту;

T_ϕ – фактичний міжремонтний період;

β – коефіцієнт, що показує зростання трудомісткості ремонту деталей вузла при міжремонтному обслуговуванні за рахунок збільшення об'єму складально-розбірних робіт.

Коефіцієнт β залежить від конструкції технічного об'єкта, його можна розрахувати або визначити практично.

Підвищення довговічності деталей і вузлів технічного об'єкта чи складної системи, поліпшення їх конструкцій і технології ремонту повністю сприятиме підвищенню надійності й довговічності лише за умови правильно вибраних основних параметрів системи ремонту і насамперед структури ремонтного циклу і величини міжремонтного періоду.

Перераховані методи підвищення надійності не є обов'язковими для будь-якої системи. Одні методи можуть бути використані для підвищення надійності системи одного класу, інші - для іншого. Все залежить від типу системи і умов її експлуатації.

Контрольні питання

1. Які методи належать до методів підвищення надійності, що застосовуються при проектуванні?
2. В чому полягає ефективність методів підвищення надійності, що застосовуються при проектуванні?
3. Що є основою для прогнозування надійності проєктованих об'єктів (систем)?
4. На якому етапі проектування вибирають потрібний рівень надійності ТС?
5. На чому ґрунтуються розрахунки для прогнозування надійності технічних об'єктів (систем)?

ТЕМА 12: СТРУКТУРНЕ РЕЗЕРВУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

- 12.1 Резервування технічних систем.
- 12.2 Класифікація способів резервування.
- 12.3. Кратність структурного резервування.
- 12.4 Розрахунок надійності систем з резервуванням.

12.1 Резервування технічних систем

Проектування будь-якого технічного об'єкта передбачає вибір такої конструкції, яка б мала найменшу кількість складових елементів, відмова яких не призводила б до невиконання об'єктами якоїсь з покладених на нього функцій. Водночас, такий спрощений об'єкт може мати низькі показники надійності, а тому потрібно застосовувати різні методи їх підвищення. Насамперед розглядають можливості використання високонадійних елементів, зміни конструкції і принципу дії об'єкта. Якщо розв'язати проблему не вдається, то застосовують **резервування** – метод підвищення надійності об'єкта.

Для підвищення надійності складних систем часто застосовують **структурне резервування**, тобто введення в структуру об'єкта додаткових елементів, що виконують функції основних елементів в разі їх відмови.

Під резервуванням розуміють застосування певних засобів і можливостей з метою забезпечення працездатності об'єкта при відмові. У системах з резервуванням виділяють основний і резервний елементи: перший являє собою елемент структури об'єкта, відмова якого при відсутності резервування призводить до втрати працездатності об'єкта, другий - елемент, призначений для забезпечення працездатності об'єкта в разі відмови основного елемента.

Розрізняють загальне і роздільне резервування: **загальним** називають метод підвищення надійності, при якому резервується об'єкт (система) в цілому, **роздільним** – метод резервування окремих елементів для системи.

Резервування розділяють на **постійне** і резервування **заміщенням**. При постійному резервуванні резервні зразки підключені до основних протягом всього часу роботи знаходяться в однаковому з ними режимі.

Для підвищення надійності обладнання нафтогазової галузі часто застосовують структурне резервування, тобто введення в структуру об'єкта додаткових елементів, що виконують функції основних елементів в разі їх відмови.

12.2 Класифікація способів резервування

Класифікація різних способів резервування здійснюється за такими ознаками:

а) за схемою включення резерву:

- загальне резервування, при якому резервують об'єкт в цілому;
- роздільне резервування, при якому резервують окремі елементи або їх групи;
- змішане резервування, при якому різні види резервування поєднують в од-

ному об'єкті;

б) за способом включення резерву;

- постійне резервування - без перебудови структури об'єкта при виникненні відмови його елемента;

- динамічне резервування, при якому при відмові елемента відбувається перебудова структури схеми. У свою чергу воно поділяється на:

1) резервування заміщенням, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного;

2) ковшне резервування, при якому кілька основних елементів резервується одним або декількома резервними, кожен з яких може замінити будь-який основний (тобто групи основних і резервних елементів ідентичні);

в) за станом резерву;

- навантажене (гаряче) резервування, при якому резервні елементи (або один з них) постійно приєднані до основних і знаходяться в однаковому з ними режимі роботи; воно застосовується тоді, коли не допускається переривання функціонування системи під час перемикання елемента, що відмовив на резервний;

- полегшене резервування, при якому резервні елементи (принаймні один з них) знаходяться в менш навантаженому режимі порівняно з основними, і ймовірність їх відмови в цей період мала;

- ненавантажене (холодне) резервування, при якому резервні елементи до початку виконання ними функцій знаходяться в ненавантаженому режимі. В цьому випадку для включення резерву є необхідним відповідний пристрій. Відмова ненавантажених резервних елементів до включення замість основного елемента є неможливою.

Структурне резервування передбачає введення надмірності. При цьому надмірні резервні структурні елементи виконують робочі функції при відмові відповідних основних або протягом усього періоду функціонування об'єкта.

Структурне резервування може бути загальним і поелементним. Розрізняють загальне постійне, поелементне постійне, загальне заміщувальне, поелементне заміщувальне і ковшне (з дробовою кратністю), резервування систем і підсистем (рис. 12.1).

При постійному резервуванні (рис. 12.1, а, б,) резервні елементи працюють нарівні з основними, а тому немає потреби у пристроях, що включають в резерв. Такий вид резервування називають **пасивним**.

При заміщувальному резервуванні (рис. 12.1, в, г) у разі відмови основного елемента вмикають резервний, а тому такий вид резервування називають **активним**.

Ковзне резервування (рис. 12.1, д) – окремий вид заміщувального – застосовують тоді, коли до складу системи входять однотипні елементи. Тоді група основних елементів може мати один або кілька резервних.

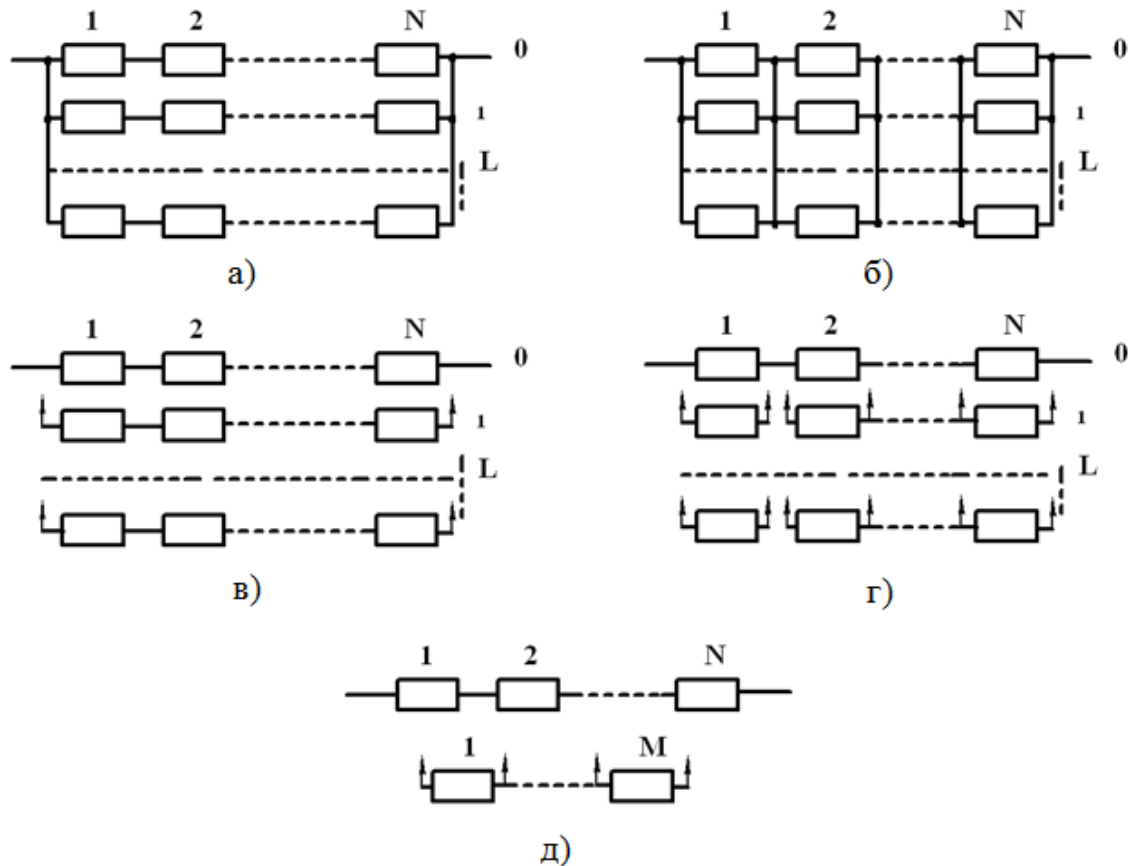


Рисунок 12.1 - Схеми резервування:

- а – загального постійного;
- б – поелементного постійного;
- в – загального заміщувального;
- г – поелементного заміщувального;
- д – ковзного

12.3. Кратність структурного резервування

Основною характеристикою структурного резервування є **кратність резервування** - відношення числа резервних елементів до числа резервованих ними основних елементів, виражене нескорочуваним дробом (типу 2 : 3; 4 : 2 і т.д.):

$$k = (n - r) / r, \quad (12.1)$$

де n – кількість однотипних елементів;

r – кількість необхідних для функціонування системи працюючих елементів.

Зменшення k може бути цілим, якщо $r=1$, та дробовим, якщо $r>1$. В останньому випадку, яким би не вийшов дріб, скорочувати його не можна. Кратність резервування $k = 4 / 2$ означає, що застосовано резервування з дробовою кратністю, причому для нормальної роботи об'єкта потрібно не менш як два елементи, а кількість резервних дорівнює чотирьом. Якщо скоротити цей дріб і записати, що $k = 2$, то це означатиме, що реалізовано резервування з цілою кратністю. Причому резервних елементи – два, а загальна кількість елементів з'єднання – три. Очевидно, що скорочення дробу змінило сутність резервування.

Резервування одного основного елементу одним резервним (тобто з кратністю 1: 1) називають **дублюванням**.

Кількісно підвищення надійності системи в результаті резервування або застосування високонадійних елементів можна оцінити за коефіцієнтом виграшу надійності, що визначають як відношення показника надійності до і після перетворення системи. Наприклад, для системи з елементів (k -го) аналогічним по надійності елементом коефіцієнт виграшу надійності за ймовірністю безвідмовної роботи складе

$$G_p = \frac{P''}{P} = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_{k-1} [1 - (1 - p_k)^2] \cdot p_{k+1} \cdot \dots \cdot p_n}{p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_{k-1} \cdot p_k \cdot p_{k+1} \cdot \dots \cdot p_n} = \frac{1 - (1 - p_k)^2}{p_k} = 2 - p_k,$$

де P і P'' - ймовірності безвідмовної роботи відповідно до і після перетворення системи.

З формули слід, що ефективність резервування (або іншого прийому підвищення надійності) є тим більшою, чим меншою є надійність зарезервованого елемента (при $p_k = 0,9$ $G_p = 1,1$; при $p_k = 0,5$ $G_p = 1,5$). Отже, при структурному резервуванні максимального ефекту можна домогтися при резервуванні самих ненадійних елементів (або груп елементів).

У загальному випадку при виборі елемента (або групи елементів) для підвищення надійності або резервування необхідно виходити з умови забезпечення при цьому максимального ефекту. Наприклад, для мостової схеми (рис. 12.2, а) з формули (12.2) можна отримати вираз для часткових похідних ймовірності безвідмовної роботи системи за ймовірністю безвідмовної роботи кожного з елементів, які для ідентичних по надійності елементів приймають такий вигляд:

$$\frac{dp}{dp_1} = \frac{dp}{dp_2} = \frac{dp}{dp_4} = \frac{dp}{dp_5} = p \cdot q^3 + 4p^2 \cdot q^2 + p^3 \cdot q, \quad (12.2)$$

$$\frac{dp}{dp_1} = 2p^2 \cdot q^2. \quad (12.3)$$

Очевидно, що максимальне збільшення надійності системи забезпечить збільшення надійності або резервування того елемента, часткова похідна для якого за даних умов приймає максимально позитивне значення. Порівняння виразів (12.2) і (12.3) показує, що при будь-яких позитивних значеннях p і q вираз (12.2) є більшим виразу (12.3) і, отже, в мостовій схемі з ідентичними елементами ефективність підвищення надійності або резервування "периферійних" елементів 1, 2, 4 і 5 (див. рис. 12.2, а) є вищою, ніж для діагонального елемента 3, якщо в якості критерію ефективності взяти ймовірність безвідмовної роботи.

Таким чином, найбільший вплив на надійність системи надають елементи, які володіють високим значенням похідної $\frac{dp}{dp_i}$, а при послідовному з'єднанні вони є найменш надійними.

У більш складних випадках для вибору елементів, що підлягають зміні, використовують як аналітичні, так і чисельні методи оптимізації надійності.

Структурне резервування пов'язане з додатковими витратами на резервні елементи [10]. Вони мають окупатися за рахунок збільшення надійності об'єкта і зниження на його технічне обслуговування.

Найпростіші показники ефективності резервування є такими:

$$B_m = T_{p.c} / T; \quad B_{p.c} = P_{p.c} / P; \quad BQ = Q / Q_{p.c}, \quad (12.2)$$

де B_m – коефіцієнт підвищення середнього напрацювання до відмови резервованої системи $T_{p.c}$ порівняно з напрацюванням нерезервованої T ;

B_p , BQ – відповідно коефіцієнти підвищення ймовірності безвідмовної роботи P і зменшення ймовірності відмови Q .

Резервування буде ефективним за умови, що B_m і B_p будуть більшими, а BQ – меншим за одиницю.

12.4 Розрахунок надійності систем з резервуванням

Розрахунок кількісних характеристик надійності систем з резервуванням окремих елементів або груп елементів багато в чому визначається видом резервування. Нижче розглядаються схеми розрахунків для найпоширеніших випадків простого резервування, до яких шляхом перетворень може бути приведеною і структура змішаного резервування. При цьому розрахункові залежності були отримані без урахування надійності перемикаючих пристроїв, що забезпечують перерозподіл навантаження між основними і резервними елементами (тобто для "ідеальних" перемикачів). В реальних умовах введення перемикачів в структурну схему необхідно враховувати і в розрахунку надійності систем.

Розрахунок систем з навантаженим резервуванням здійснюють за формулами послідовного і паралельного з'єднання елементів аналогічно розрахунку комбінованих систем (п. 12.5). При цьому вважають, що резервні елементи працюють в режимі основних як до, так і після їх відмови, тому надійність резервних елементів не залежить від моменту їх переходу з резервного стану в основний і дорівнює надійності основних елементів.

Для системи з послідовним з'єднанням n елементів (рис. 12.1 а) при загальному резервуванні з кратністю l (рис. 12.1, а)

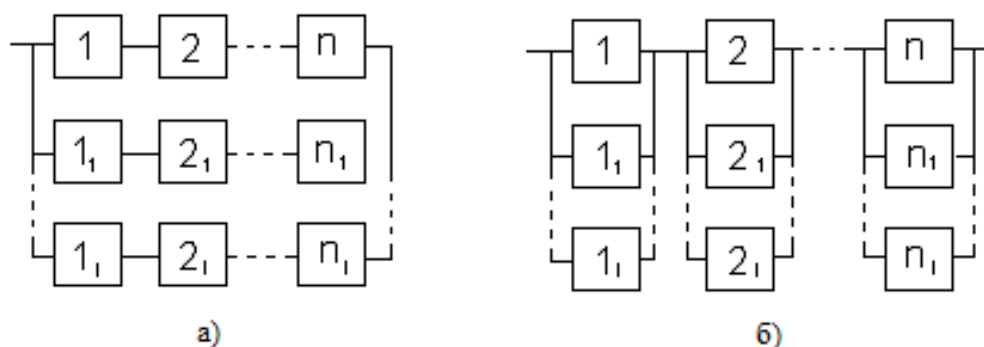


Рисунок 12.1 – Загальне а) і роздільне б) навантажене резервування

$$P_{\text{оо}} = 1 - (1 - P)^{l+1} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i\right)^{l+1}. \quad (12.4)$$

Зокрема, при дублюванні ($l = 1$)

$$P_{об} = 1 - (1 - P)^2 = P(2 - P). \quad (12.5)$$

При роздільному резервуванні (рис. 12.1, б)

$$P_{раз} = \prod_{i=1}^n \left[1 - (1 - p_i)^{l+1} \right], \quad (12.6)$$

а при роздільному дублюванні ($l = 1$)

$$P_{раз} = \prod_{i=1}^n \left[1 - (1 - p_i)^2 \right] = \prod_{i=1}^n p_i (2 - p_i) = P \prod_{i=1}^n (2 - p_i). \quad (12.7)$$

Тоді коефіцієнти виграшу надійності за ймовірністю безвідмовної роботи при дублюванні

$$G_{об} = \frac{P_{об}}{P} = 2 - P, \quad G_{раз} = \frac{P_{раз}}{P} = \prod_{i=1}^n (2 - p_i), \quad (12.8)$$

звідки випливає, що роздільне резервування є ефективнішим загального (наприклад, для системи з трьох однакових елементів при $p = 0,9$ $G_{об} = 1,27$, $G_{раз} = 1,33$).

При ненавантаженому резервуванні резервні елементи послідовно включаються в роботу при відмові основного, потім першого резервного і т.д. (рис. 12.2), тому надійність резервних елементів залежить від моменту їх переходу в основний стан. Таке резервування в різних ТС зустрічається найбільш часто, тому що воно по суті є аналогічним заміні елементів і вузлів, що відмовили, на запасні.

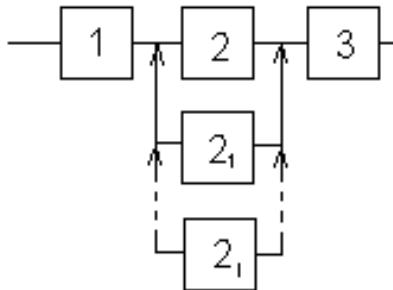


Рисунок 12.2 – Схема ненавантаженого резервування

Якщо резервні елементи до їх включення є абсолютно надійними, то для системи з ненавантаженим резервуванням кратності l (всього елементів $l + 1$)

$$Q = \frac{1}{(l+1)!} \prod_{i=1}^{l+1} q_i; \quad P = 1 - \frac{1}{(l+1)!} \prod_{i=1}^{l+1} (1 - p_i), \quad (12.9)$$

тобто ймовірність відмови є в $(l+1)!$ разів меншою, ніж при навантаженому (паралельному з'єднанні, див. формулу (12.7)).

Для ідентичних по надійності основного і резервного елементів

$$P = 1 - \frac{1}{(l+1)!} (1 - p)^{l+1}. \quad (12.10)$$

При експонентному розподілі напрацювання (найпростішому потоці відмов, см. пп. 7.3.2) у разі $\lambda t \ll 1$ можна скористатися наближеною формулою

$$P \approx 1 - \frac{(\lambda \cdot t)^{l+1}}{(l+1)!}. \quad (12.11)$$

При ненавантаженому резервуванні середнє напрацювання на відмову

$$T = \sum_{i=1}^{l+1} T_{0i}, \quad (12.12)$$

а для ідентичних елементів $T_0 = nT_{0i}$.

Полегшене резервування використовують при великій інерційності перехідних процесів, що відбуваються в елементі при його переході з резервного в основний режим, і недоцільності застосування навантаженого резервування з - за недостатнього виграшу в надійності. Очевидно, полегшений резерв займає проміжне положення між навантаженим і ненавантаженим.

Точні вирази для розрахунку надійності систем при полегшеному резервуванні є дуже громіздкими і неоднозначними, однак при експонентному розподілі напрацювання є справедливою наближена формула

$$P = \frac{1}{(l+1)!} \lambda (\lambda + \lambda_0)(\lambda + 2\lambda_0) \dots [\lambda \ l \ \lambda_0] \cdot t^{l+1} = \frac{t^{l+1}}{(l+1)!} \prod_{i=0}^l (\lambda + i\lambda_0), \quad (12.13)$$

де λ_0 - інтенсивність відмов елементів в полегшеному режимі;

l - кратність резервування.

Ковзне резервування використовують для резервування кількох однакових елементів системи одним або декількома однаковими резервними (рис. 12.3, тут всі елементи є ідентичними, а елемент 4 - надлишковим).

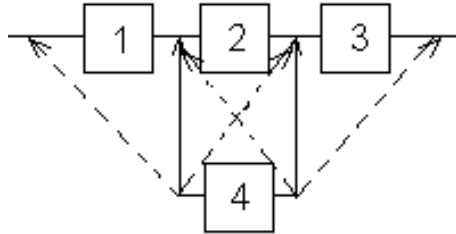


Рисунок 12.2 – Схема ковзного резервування

Очевидно, відмова системи відбудеться, якщо із загальної кількості ідентичних елементів (основних і резервних) число тих, що відмовили, перевищує число резервних. Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи систем зі змінним резервуванням є аналогічним розрахунку систем типу " m з n ", див. п. 12.3.

Контрольні питання

1. Дайте характеристику структурного резервування технічних об'єктів в системі.
2. Чим відрізняються загальне і роздільне резервування?
3. Чим відрізняються постійне і резервування заміщенням?
4. Поясніть класифікацію способів резервування.
5. Наведіть схему ковзного резервування і поясніть її роботу. У якому разі її застосовують?
6. Як визначити кратність резервування?
7. Що називають дублюванням?
8. Якими є найпростіші показники ефективності резервування?
9. Як розрахувати надійність системи з резервуванням?
10. Яке резервування є більш ефективним: загальне чи роздільне? Чому?
11. В якому разі використовують полегшене резервування?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ємченко О. А., Смоляков С. Л. Основи надійності і довговічності промислового обладнання: навч. посіб. для студ. ВНЗ. Харків: Укр. інж.-пед. акад., 2011. 180 с.
2. Павлюк О. М. Основи теорії надійності / О. М. Павлюк, М. О. Медиковський, Н. К. Лиса, І. В. Ізонін / Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 208 с.
3. Копей Б. В. Підвищення надійності газотранспортних систем: монографія / Б. В. Копей, А. Бенмуна, В. І. Слободян, А. Беллауар, С. І. Галій, Д. Халімі, А. М. Найда. Серія «Нафтогазове обладнання», том 8 - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. - 300 с.
4. ДСТУ 2862-94 Методи розрахунку показників надійності.
6. ДСТУ 3433-96 Моделі відмов.
7. Копей Б. В. Розрахунок, монтаж і експлуатація бурового обладнання: підр. для ВНЗ. Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, Факел, 2001. 446 с.
8. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Бурове і технологічне обладнання. Харків: ХНУМГ, НТУ «ХПІ», ТОВ НТП «Бурова техніка», Львів, Видавництво «Новий Світ – 2000», 2021. 358 с. <http://library.kpi.kharkov.ua>
9. Скиба М. Є., Іщук В. І. Експлуатація, обслуговування та ремонт машин. Хмельницький: ХНУ, 2005. 209 с.
10. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин. Київ: Либідь, 2003. 424 с.
11. Миронов Ю. Б., Романішин Л. І. Практикум з курсу «Машини і обладнання для буріння нафтових і газових скважин». Івано-Франківський ДТУ «Нафти і газу», 2002. 120 с. URL: <https://dlc.kpi.kharkov.ua/course/view.php?id=532>

Таблиця А.1 – Таблиця станів системи "2 з 5"

N стану	Стан елементів					Стан системи	Ймовірність стану
	1	2	3	4	5		
1	+	+	+	+	+	+	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p^4 q^1 = p^4(1-p)$
3	+	+	+	-	+	+	
4	+	+	-	+	+	+	
5	+	-	+	+	+	+	
6	-	+	+	+	+	+	
7	+	+	+	-	-	+	$p^3 q^2 = p^3(1-p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	
9	+	-	+	+	-	+	
10	-	+	+	+	-	+	
11	+	+	-	-	+	+	
12	+	-	+	-	+	+	
13	-	+	+	-	+	+	
14	+	-	-	+	+	+	
15	-	+	-	+	+	+	
16	-	-	+	+	+	+	$p^2 q^3 = p^2(1-p)^3$
17	+	+	-	-	-	+	
18	+	-	+	-	-	+	
19	-	+	+	-	-	+	
20	+	-	-	-	+	+	
21	-	+	-	-	+	+	
22	-	-	-	+	+	+	
23	+	-	-	+	-	+	
24	-	+	-	+	-	+	
25	-	-	+	-	+	+	
26	-	-	+	+	-	+	$p^1 q^4 = p^1(1-p)^4$
27	+	-	-	-	-	-	
28	-	+	-	-	-	-	
29	-	-	+	-	-	-	
30	-	-	-	+	-	-	
31	-	-	-	-	+	-	$q^5 = (1-p)^5$
32	-	-	-	-	-	-	

Таблиця Б.1 – Біноміальні коефіцієнти $C_n^m = \frac{n!}{m! \cdot (n - m)!}$

n	m										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1										
1	1	1									
2	1	2	1								
3	1	3	3	1							
4	1	4	6	4	1						
5	1	5	10	10	5	1					
6	1	6	15	20	15	6	1				
7	1	7	21	35	35	21	7	1			
8	1	8	28	56	70	56	28	8	1		
9	1	9	36	84	126	126	84	36	9	1	
10	1	10	45	120	210	252	210	120	45	10	1
11	1	11	55	165	330	462	462	330	165	55	11
12	1	12	66	220	495	792	924	792	495	220	66
13	1	13	78	286	715	1287	1716	1716	1287	715	286
14	1	14	91	364	1001	2002	3003	3432	3003	2002	1001
15	1	15	105	455	1365	3003	5005	6435	6435	5005	3003
16	1	16	120	560	1820	4368	8008	11440	12870	11440	8008
17	1	17	136	680	2380	6188	12376	19448	24310	24310	19448
18	1	18	153	816	3060	8568	18564	31824	43758	48620	43758
19	1	19	171	969	3876	11628	27132	50388	75582	92378	92378
20	1	20	190	1140	4845	15504	38760	77520	125970	167960	184756

Таблиця В.1 – Формули для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи систем типу
 "m з n" при $m \leq n \leq 5$

Загальна кількість елементів, n					
m	1	2	3	4	5
1	p	$2p - p^2$	$3p - 3p^2 + p^3$	$4p - 6p^2 + 4p^3 - p^4$	$5p - 10p^2 + 10p^3 - 5p^4 + p^5$
2	-	p^2	$3p^2 - 2p^3$	$6p^2 - 8p^3 + 3p^4$	$10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5$
3	-	-	p^3	$4p^3 - 3p^4$	$10p^3 - 15p^4 + 6p^5$
4	-	-	-	p^4	$5p^4 - 4p^5$
5	-	-	-	-	p^5

Таблиця Г.1 – Таблиця станів мостової схеми

N стану	Стан елементів					Стан си- стеми	Ймовірність стану	
	1	2	3	4	5		у загальному випадку	при елементах з однаковою надійністю
1	+	+	+	+	+	+	$p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5$	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5$	$p^4 q = p^4(1-p)$
3	+	+	+	-	+	+	$p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5$	
4	+	+	-	+	+	+	$p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5$	
5	+	-	+	+	+	+	$p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5$	
6	-	+	+	+	+	+	$q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5$	
7	+	+	+	-	-	-	$p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5$	$p^3 \cdot q^2 = p^3(1-p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	$p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5$	
9	+	-	+	+	-	+	$p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5$	
10	-	+	+	+	-	+	$q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5$	
11	+	+	-	-	+	+	$p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5$	
12	+	-	+	-	+	+	$p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5$	
13	-	+	+	-	+	+	$q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5$	
14	+	-	-	+	+	+	$p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5$	
15	-	+	-	+	+	+	$q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5$	
16	-	-	+	+	+	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5$	

Продовження табл. Г.1

17	+	+	-	-	-	-	$p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5$	$p^2 \cdot q^3 = p^2(1-p)^3$
18	+	-	+	-	-	-	$p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5$	
19	-	+	+	-	-	-	$q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5$	
20	+	-	-	-	+	-	$p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5$	
21	-	+	-	-	+	+	$q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5$	
22	-	-	-	+	+	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5$	
23	+	-	-	+	-	+	$p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5$	
24	-	+	-	+	-	-	$q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5$	
25	-	-	+	-	+	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5$	
26	-	-	+	+	-	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5$	
27	+	-	-	-	-	-	$p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5$	$p \cdot q^4 = p(1-p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	$q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5$	
29	-	-	+	-	-	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5$	
30	-	-	-	+	-	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5$	
31	-	-	-	-	+	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5$	
32	-	-	-	-	-	-	$q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5$	$q^5 = (1-p)^5$

Навчальне видання

ПРОКОПЕНКО Олена Олександрівна
АНТОНЕНКО Наталія Сергіївна

НАДІЙНІСТЬ І ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ

Навчально-методичний посібник

Формат 60x84/16 Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.
Ум. друк. арк. 7,5
Тираж б.в.
Українська інженерно-педагогічна академія.
61003, м. Харків, вул. Університетська, 16

