

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

СХЕМОКОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з навчальної дисципліни

«Надійність електронних пристроїв і систем»

для студентів денної та заочної форм навчання
спеціальності 171 Електроніка

Луцьк, 2023

Схемоконспект лекцій з навчальної дисципліни «Надійність електронних пристроїв і систем» для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 171 Електроніка [Електронний ресурс] / уклад. : Т.В. Алтухова, Е.А. Петелін. – Луцьк : ДонНТУ, 2023. – 190 с.

Навчальна дисципліна «Надійність електронних пристроїв і систем» є актуальною і затребуваною у контексті підготовки висококваліфікованих фахівців з технічного обслуговування та підвищення ефективності функціонування електронних пристроїв та систем. Схемоконспект лекцій дозволить забезпечити студентам необхідну допомогу під час вивчення ними ключових положень базових тем курсу. Схематична форма конспекту акцентує увагу студентів на закріпленні основних фахових знань, формуванні відповідних умінь і в цілому отриманні ними кваліфікаційних компетентностей.

Укладачі: Т. В. Алтухова, канд. техн. наук, доцент кафедри електронної техніки

Е. А. Петелін, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електронної техніки

Рецензент: Калиниченко В.В., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки

Відповідальний за випуск: Вовна О.В., д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електронної техніки

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ, протокол № 9 від 27.06.2023 р.

Розглянуто на засіданні кафедри електронної техніки ДВНЗ «ДонНТУ» протокол № 12 від 20.06.2023 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ТЕМА №1. Загальні положення теорії надійності.....	6
1.1 Загальне поняття надійності та її причини виникнення і напрями розвитку.....	7
1.2 Основні поняття і терміни теорії надійності.....	10
1.3 Класифікація електронних систем.....	16
1.4 Проблеми забезпечення надійності	24
ТЕМА №2. Основні закони розподілу випадкових величин, що використовуються при аналізі надійності електронних пристроїв та систем.....	28
2.1 Загальні поняття розподілу випадкових величин.....	29
2.2 Закони розподілу дискретних величин.....	36
2.3 Закони розподілу неперервних величин.....	40
2.4 Шляхи підвищення надійності апаратури.....	51
ТЕМА №3. Основні показники надійності електронних пристроїв та систем.....	60
3.1 Класифікація електронної апаратури. Поняття елемента і системи.....	61
3.2 Моделі надійності.....	69
3.3 Показники надійності	72
ТЕМА №4. Методи розрахунку надійності електронних систем	79
4.1 Класифікація методів розрахунку надійності електронних систем.....	80
4.2 Алгоритм розрахунку надійності систем	99
ТЕМА №5. Основні етапи та види розрахунків показників надійності електронних пристроїв та систем.....	102
5.1 Види розрахунку надійності елементів і систем	103
5.2 Основні етапи розрахунку надійності елементів і систем.....	106
5.3 Методи оцінки надійності РЕУ при появі раптових відмов.....	108
5.4 Наближений розрахунок надійності електронних пристроїв.....	116
5.5 Уточнений розрахунок надійності електронних пристроїв.....	119

Тема № 6. Структурно-логічний аналіз електронних систем.....	123
6.1 Структурні моделі надійності	124
6.2 Методи структурно-логічного аналізу ЕС.....	130
6.3 Мосткові та комбіновані схеми та методи їх логічного аналізу.....	135
ТЕМА № 7. Підвищення надійності електронних систем.....	143
7.1 Заходи, що використовуються для підвищення надійності технічних засобів.....	144
7.2 Основні поняття, означення і класифікація методів резервованих.....	150
7.3 Загальне резервування з постійно включеним резервом і цілою кратністю	165
7.4 Роздільне резервування з постійно включеним резервом і цілою кратністю	167
7.5 Загальне і роздільне резервування заміщенням з цілою кратністю	169
7.6 Резервування з дробовою кратністю.....	176
7.7 Розрахунок надійності ТЗ з інформаційною надлишковістю	182
7.8 Розрахунок надійності ТЗ із тимчасовим резервуванням	186
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	190

ВСТУП

На сьогоднішній день з розвитком технічного прогресу дедалі актуальнішими стають питання підвищення надійності різноманітних технічних пристроїв і систем, в тому числі електронних пристроїв та систем. Надійність є найважливішим техніко-економічним показником якості будь-якого пристрою або системи. У зв'язку з цим у разі широкого застосування різноманітних електронних приладів та систем саме технічний рівень будь-якого виробництва більшою мірою визначається саме їх надійністю, тим паче їх відмови у процесі експлуатації завдають значної матеріальної шкоди економіці країни і споживачеві.

Надійність складних пристроїв і систем залежить від надійності роботи його елементів, тому для забезпечення надійної їх роботи під час проєктування і виготовлення закладався певний запас міцності в окремі деталі і цим створювалася необхідна гарантія надійності роботи і довговічності служби, проте сучасна техніка вимагає істотного зменшення маси і габаритних розмірів обладнання за високої його надійності. Зараз технічні засоби складаються з безліч взаємодіючих механізмів, апаратів і приладів, тому відмова в роботі хоча б одного відповідального елемента складної системи без резервування може призвести до порушення роботи всієї системи, тому, у разі недостатньої надійності призводить до величезних витрат на ремонт, простою обладнання, припинення постачання населення електроенергією, водою, газом, транспортними засобами, іноді до аварій, пов'язаних із великими економічними втратами, руйнуванням великих об'єктів і людських жертв.

При вивченні курсів «Надійність електронних пристроїв і систем», «Надійність інформаційно-вимірювальних систем», відповідно до робочих програм з цих дисциплін, передбачено опанування студентами 7 тем, що поділені на декілька змістовних тематичних питань. Під час практичних занять з цих курсів студентам пропонується виконання спеціальних самостійних завдань, а також наводиться додатковий теоретичний матеріал, із відповідними посиланнями на нього, для поглибленого ознайомлення із деякими тематичними питаннями.

Стисле, але вичерпне подання матеріалу забезпечить студентам можливість зосередитися на основних ключових поняттях, проблемах, методах, підходах в напрямку підвищенні надійності пристроїв та систем та в цілому сприятиме формуванню у них необхідних для кваліфікаційного рівня Бакалавр знань, умінь і компетентностей.

Тема №1. Загальні положення теорії надійності

ПЛАН

- 1.1 Загальне поняття надійності та її причини виникнення і напрями розвитку*
- 1.2 Основні поняття і терміни теорії надійності*
- 1.3 Класифікація електронних систем*
- 1.4 Проблеми забезпечення надійності*

1.1 ЗАГАЛЬНЕ ПОНЯТТЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЇЇ ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ І НАПРЯМИ РОЗВИТКУ

Надійність або здатність об'єкта або виробу виконувати задані функції, є однією з основних інженерних проблем. Проблемою надійності займалися з тих пір як з'явилася техніка. Надійність пов'язана з надмірністю, в зв'язку з цим в інженерних розрахунках використовується коефіцієнт запасу, а при проектуванні коефіцієнти резервування.

До технічних прийомів, які забезпечують надійність відносяться:

1. Автоматичне включення резерву;
2. Автоматичне повторне включення електричних ліній;
3. Резервування за потужністю;
4. Різні види блокувань і захистів при ненормальних режимах роботи.

Причини, внаслідок яких виникла теорія надійності:

1. Зростання складності технічних систем включають від десятків тисяч до мільйонів елементів;
2. Інтенсивність роботи системи;
3. Складність умов в яких експлуатується система (низькі і високі температури, вологість, прискорення, радіація);
4. Вимоги до якості роботи системи (висока точність, чутливість);
5. Підвищення відповідальності функцій, що виконується системою, а також високої економічної ціни відмови;
6. Повна або часткова автоматизація, виключення контролю з боку людини.

Основні напрямки розвитку в теорії надійності:

1. Розвиток математичних основ теорії надійності, що визначають закономірності, яким підкоряються відмови, і дають методи кількісного розрахунку надійності;
2. Розвиток методів збору і обробки статистичних даних про надійність;
3. Розвиток фізичної теорії надійності, предметом якої є вивчення фізичних причин відмов, впливу старіння і міцності матеріалів на надійність.

1.2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ТЕРМІНИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

Фізичний сенс надійності полягає в здатності реалізувати закладені в технічні вироби функції і зберегти в часі закладені технічні характеристики. Однак навіть найнадійніший виріб не може зберегти свої початкові характеристики протягом необмеженого часу. Тому говорити про надійність має сенс тільки при вказівці конкретного проміжку часу, протягом якого повинні забезпечуватися задані функції і технічні характеристики.

Надійність має свій державний стандарт України **ДСТУ 2860-94** Надійність техніки. Терміни та визначення. Згідно ДСТУ під *надійністю* розуміють *властивість виробу (об'єкта) зберігати в часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.*



Безвідмовність - властивість об'єкта безупинно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або деякого напрацювання. Під напрацюванням розуміється тривалість або обсяг роботи.

Найчастіше розрізняють **добове** і **місячне напрацювання**, які відповідно рівні сумарному напрацюванню виробу за добу і за місяць. Визначають також напрацювання до першої відмови і між відмовами.

Напрацювання до першої відмови - це сумарне напрацювання виробу від моменту введення його в експлуатацію до настання першої відмови.

Напрацювання між відмовами - це сумарне напрацювання виробу між двома сусідніми відмовами.

Працездатний стан (працездатність) - стан об'єкта, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної документації (НТД) і (або) конструкторській документації.

Довговічність - властивість об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану при якому його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне, через:

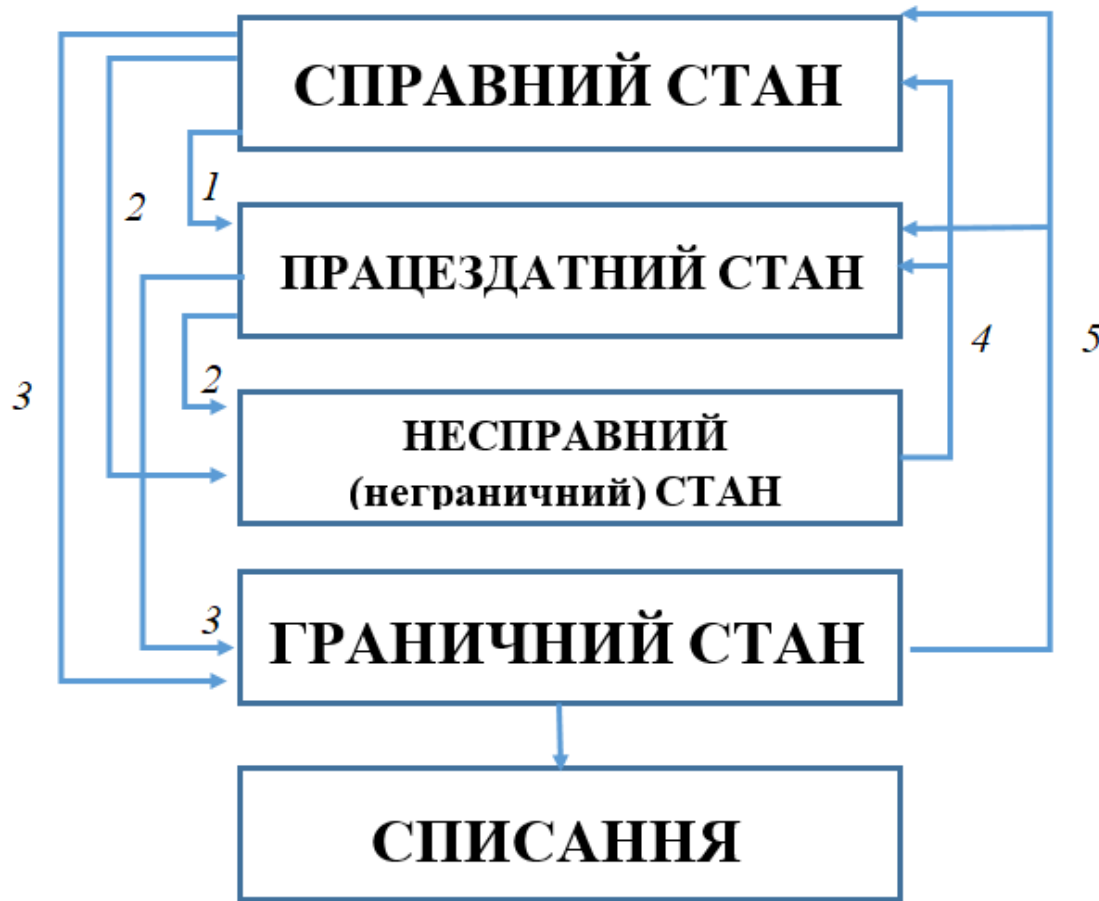
- ❖ Виникли непереборні порушення вимог безпеки;
- ❖ Стався неприпустимий догляд заданих параметрів за встановлені межі;
- ❖ Становиться неможливим підтримка безвідмовності і ефективності експлуатації об'єкта на допустимому рівні;
- ❖ В результаті зношування або старіння об'єкт прийшов в такий стан, при якому ремонт вимагає неприпустимо великих витрат або не забезпечує необхідного ступеня відновлення працездатності і справності.

Ремонтоздатність - властивість об'єкта, що полягає в пристосованості до підтримання та відновлення працездатного стану шляхом проведення технічного обслуговування і ремонту. Ремонтопридатність повинна закладатися на стадії проектування і виготовлення. Основні фактори, що визначають ремонтпридатність:

- ❖ доступність елементів апаратури для контролю, профілактики та ремонту;
- ❖ застосування принципів блокової і модульної компоновки, рівень стандартизації і уніфікації вузлів;
- ❖ маркування;
- ❖ автоматизація контролю і індикації відрізків;
- ❖ захищеність від помилок обслуговуючого персоналу.

Збережуваність - властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати необхідні функції протягом і після зберігання та (або) транспортування.

Схема основних станів технічних виробів



- 1 - пошкодження;
- 2 - відмова;
- 3 - перехід об'єкта в граничний стан через непереборне порушення вимог безпеки, зниження ефективності експлуатації, морального старіння і інших чинників;
- 4 - відновлення;
- 5 - ремонт

Справний стан (справність) - коли об'єкт відповідає всім вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Несправний стан - коли об'єкт не відповідає хоча б одній вимозі нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

1.3 КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

ТС можна класифікувати наступним чином:

- ❖ відновлювана ТС - називається така ТС, працездатність якої в разі виникнення відмови підлягає відновленню в ситуації, що розглядається.
- ❖ невідновлювальна ТС - система, при відмові якої з якихось причин визнається недоцільним або неможливим.

Ремонтованою ТС називається система, несправність або працездатність якої в разі виникнення відмови або пошкодження підлягають відновленню.

Пристрій, що не ремонтується, завжди є і невідновлюваним (наприклад, резистор, конденсатор, і т.п.). У той же час, *пристрій, що ремонтується*, може бути як відновлюваний, так і невідновлений - все залежить від існуючої системи технічного обслуговування і ремонту, конкретної ситуації в момент відмови.

Обслуговуючий об'єкт - об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування передбачено нормативно-технічною й (або) конструкторською (проектною) документацією, а *необслуговуючий об'єкт* - об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування не передбачено.

За характером застосування всі об'єкти можна поділити на об'єкти *багаторазового, безперервного, однократного і загального* застосування. На відміну від об'єктів багаторазового застосування об'єкти однократного застосування після їх використання за призначенням звичайно припиняють своє існування.

Залежно від режиму роботи розрізняють об'єкти, що працюють у *безперервному* й *циклічному режимах*. У *безперервному режимі* об'єкти постійно перебувають у ввімкненому стані й вимикаються лише для технічного обслуговування або ремонту. У *циклічному режимі* об'єкти вмикаються періодично у випадкові або заплановані моменти часу, і таким чином, значну частину часу перебувають у ввімкненому стані. Облік характеру застосування й режиму роботи об'єкта є однією з необхідних умов правильності розрахунків показників його надійності.

Пошкодження - подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкта при збереженні працездатного стану. Багато пошкоджень згодом, якщо їх не усунути, призводять до відмови виробу.

Фундаментальним поняттям теорії надійності є поняття ***відмови*** - події, що полягають в порушенні працездатності об'єкта.

Розрізняють відмови:

- повну;
- часткову;
- конструкційну;
- ресурсну;
- виробничу;
- систематичну.

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

Збій — це само усувна (одноразова) відмова, яку незначним втручанням усуває оператор.

Повторювальна відмова — це само усувна відмова одного й того ж характеру, що виникає багаторазово.

Деградована відмова — це відмова, спричинена процесами деградації в об'єкті, при дотриманні всіх встановлених правил, норм виготовлення та експлуатації.

Раптова відмова — відмова, яку неможливо визначити (передбачити) дослідженнями, технічним оглядом.

Поступова відмова — відмова, спричинена поступовими змінами одного чи декількох параметрів об'єкта, її можна передбачити дослідженням чи технічним оглядом а також її інколи можна відвернути заходами технічного обслуговування.

Слід *розрізняти відмови*:

- ❖ враховані та невраховані;
- ❖ залежні та незалежні.

Враховані відмови — як правило заносять у розрахунок величини показника безвідмовності.

Невраховані відмови — вилучають з розрахунку величини показника безвідмовності.

Залежна відмова — це відмова об'єкта спричинена прямо чи непрямо відмовою або несправністю іншого об'єкта.

Незалежна відмова — це відмова не спричинена прямо чи непрямо відмовою або несправністю іншого об'єкта.

Стосовно до відмови розглядають: *критерій, причину, ознаки (прояви), характер і наслідки*.

Працездатний стан об'єкта визначається переліком заданих параметрів і межами їх зміни - допусками.

Ознаки, що дозволяють встановити факт порушення працездатного стану, є *критеріями відмови*. Критерії відмови зазначаються в конструкторській документації на виріб. Крім критеріїв відмови в цілому для об'єкта, можуть бути додатково сформульовані критерії відмов окремих елементів, виходячи з функціонального призначення.

Причини відмови - це явища, процеси, події і стани, що зумовили виникнення відмови.

За характером усунення відмови діляться на стійкі і відмови, що самоусувається. Стійка відмова усувається заміною елемента, що відмовив (модуля), а відмова, що сама усувається зникає сама, але може повторитися. Відмова, що усувається сама, може проявитися у вигляді збою або в формі відмови, що виникає через проміжки часу. Виявити і усунути їх буває дуже складно. Відмова типу збою особливо характерний для РЕА.

Поява збоїв обумовлюється *зовнішніми* і *внутрішніми* факторами.

До *зовнішніх факторів* належать коливання напруги живлення, вібрації, температурні коливання. Спеціальними заходами (стабілізації живлення, амортизація, термостатування і ін.) Вплив цих факторів може бути значно ослаблений.

До *внутрішніх факторів* належать флуктуаційні коливання параметрів елементів, несинхронність роботи окремих пристроїв, внутрішні шуми і наведення.

Незалежно від причини відмов їх об'єднує загальна ознака: випадковість виникнення навіть при поступовому накопиченні фізичних змін. Це дозволяє трактувати відмову об'єкта як випадкову подію, що визначає вибір математичного апарату теорії ймовірностей і математичної статистики при вивченні різних закономірностей відмов елементів і систем.

Ознаками відмови називають безпосередні або опосередковані впливи на органи чуття спостерігача явищ, характерних для непрацездатного стану об'єкта. До них відносяться, наприклад, зміна показань контрольних приладів і пристроїв, характерний шум, запах і т.д.

Характером відмови є конкретні зміни в об'єкті, пов'язані з виникненням відмови. Наприклад, обрив або перегорання провідника, замикання між фазами або на корпус, пошкодження ізоляції і т.д.

При розробці заходів щодо підвищення надійності важливе значення має виявлення причин відмов.

1.4 ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ

У теорії надійності можна виділити два важливих поняття: *структурну* і *параметричну* надійність.

Під оцінкою *структурної надійності* розуміють визначення кількісних показників надійності пристрою при можливості раптових відмов комплектуючих елементів. Оцінка проводиться якщо відомі комплектація і структура пристрою (структура не в схемотехническом сенсі, а в сенсі надёжностной схеми, яка зводиться до наявності або відсутності резервування). Вихідними даними для розрахунку є: характеристики надійності комплектуючих елементів, взяті в якості довідкових даних або отримані при випробуваннях.

Під оцінкою *параметричної надійності* розуміють: визначення кількісних показників робочих функцій пристрою при можливих поступових змін в умовах експлуатації. Оцінка проводиться, коли відома принципова електрична схема пристрою, комплект елементів і допуски на зміну параметрів. Вихідними даними для розрахунку є: функції старіння комплектуючих елементів, діапазон зміни параметрів зовнішнього середовища і живлячих напруг, а також залежності параметрів елементів і функціональних параметрів середовища.

Проблема забезпечення надійності пов'язана з вирішенням наступних задач:

1. Розробка методів аналізу і розрахунку надійності на стадії проектування (априорні методи);
2. Оцінка надійності за результатами випробувань (апостеріорна);
3. Вивчення фізичних процесів, що призводять до відмови;
4. Конструкторські пошуки кращих рішень (контролю, тощо);
5. Техніка виробництва;
6. Велике число експлуатаційних факторів: підготовка персоналу та інженерна психологія включені.

Надійність виробу закладається в процесі його конструювання і розраховується і забезпечується в процесі виготовлення, шляхом правильного вибору технологічного виробництва, контролю якості вихідних матеріалів і вихідної продукції, контролю режимів і умов виготовлення. Надійність зберігається застосуванням правильних способів зберігання виробів і підтриманням правильної експлуатації, доглядом, контролем, ремонтом.

При проектуванні виробів повинні бути враховані ***фактори***:

1. Якість застосовуваних компонентів і деталей, полягає в їх точності, також механічної, електронної і теплової міцності.
2. Режим роботи компонентів і деталей, також розміщення їх всередині виробу, забезпечення оптимального мікроклімату і мінімальних вібрацій.
3. Доступність частин виробу, що забезпечується модульно-блоковим принципом побудови виробу. У разі складного виробу потрібно застосовувати пристрої для автоматичного контролю.
4. Наявність захисних пристроїв (запобіжники тощо).

При виробництві виробів повинен дотримуватися ряд умов:

1. Контроль якості матеріалів і комплектації виробів;
2. Недопущення порушень режимів технологічних процесів;
3. Контроль за операціями і при випуску готової продукції.

При експлуатації основними факторами збереження є:

1. Кліматичні і довільні умови експлуатації (температура, агресивні середовища, вібрації тощо);
2. Система обслуговування, а саме періодичний огляд, контроль, налагодження, ремонт і заміна елементів;
3. Кваліфікація і відповідальність обслуговуючого персоналу.

Тема №2. Основні закони розподілу випадкових величин, що використовуються при аналізі надійності електронних пристроїв та систем

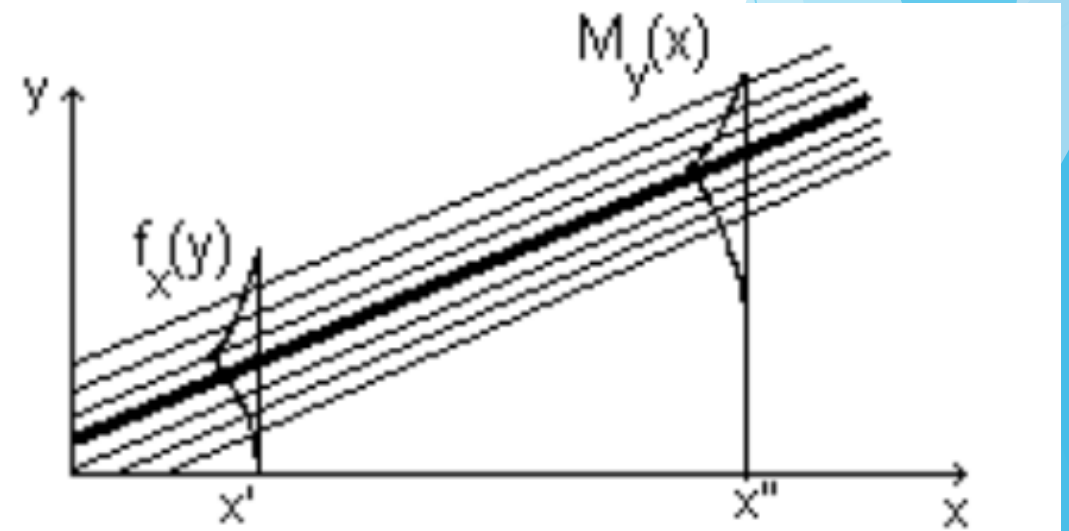
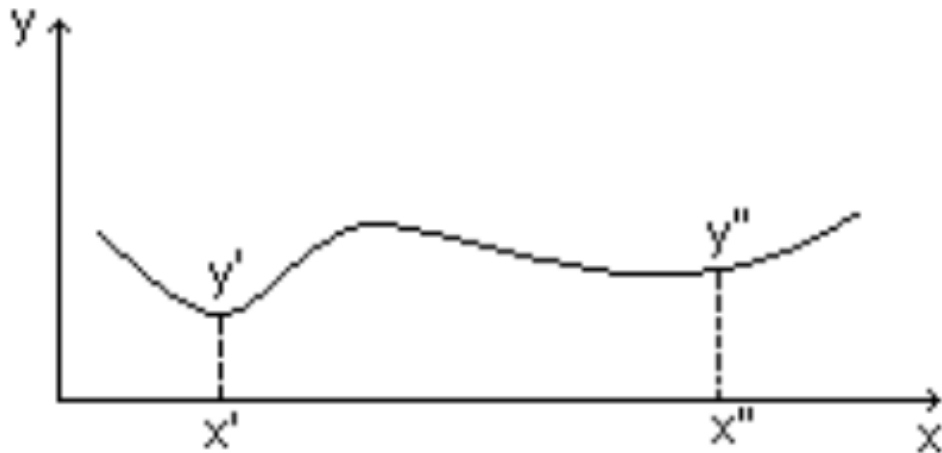
ПЛАН

- 2.1 Загальні поняття розподілу випадкових величин*
- 2.2 Закони розподілу дискретних величин*
- 2.3 Закони розподілу неперервних величин*
- 2.4 Шляхи підвищення надійності апаратури*

2.1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН

Випадкова функція - функція, яка в результаті дослідження може прийняти той чи інший конкретний вид, але невідомо заздалегідь який саме.

Конкретний вид, що приймає випадкова функція в результаті однократного дослідження, називається **реалізацією випадкової функції**.



Математичне сподівання $M[Y(x)]$ випадкової функції $Y(x)$ є не випадкова функція $m_y(X)$, яка при кожному значенні аргументу x дорівнює математичному очікуванню відповідного перетину випадкової функції.

$$M[Y(x)] = m_y(x) = \int_{-\infty}^{\infty} y \cdot f(y, x) dy,$$

$f(y, x)$ - одномірна щільність ймовірностей сімейства реалізацій випадкових функцій

Дисперсія $D[Y(x)]$ випадкової функції $Y(x)$ є не випадкова функція $D_y(X)$, значення якої для кожного x дорівнює дисперсії відповідного перетину випадкової функції.

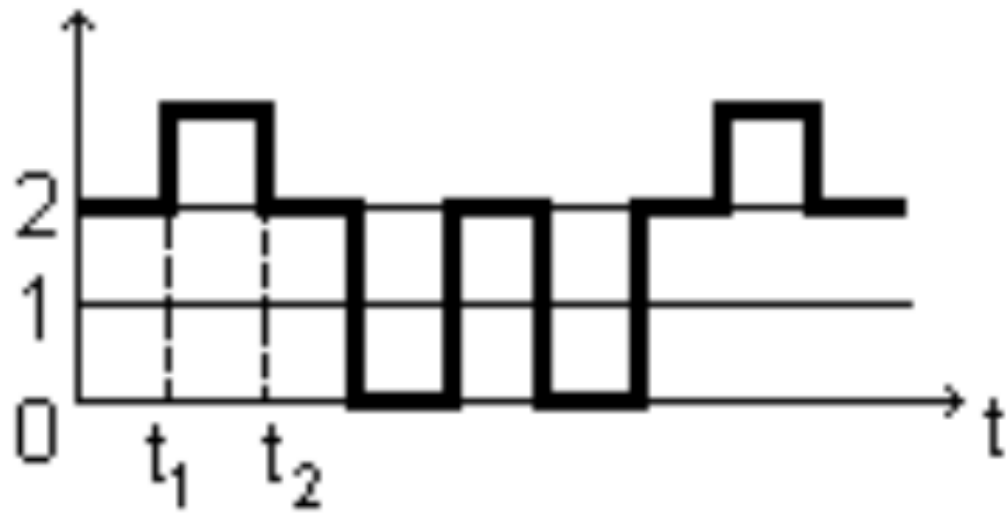
$$D[Y(x)] = D_y(x) = \int_{-\infty}^{\infty} [Y - m_y(x)]^2 \cdot f(Y, x) dy$$

Дисперсія $D_y(x)$ характеризує розкид реалізацій випадкової величини відносно математичного очікування $m_y(x)$. Рівномірна щільність розподілу $f(Y, x)$ дозволяє знайти середнє значення випадкової функції і її дисперсію, але не містить ніякої інформації про поведінку випадкової функції.

Випадковий процес - випадкова функція від незалежної змінної $t(Y(t))$. Реалізації випадкового процесу називаються **траєкторіями**. Всі характеристики випадкових функцій аналогічні характеристикам випадкової функції.

Марковські випадкові процеси вважається основним методом аналізу надійності систем: визначення характеристик резервованих систем, аналіз моделі і контролю, пошук несправностей і т.д.

Марковський випадковий процес - це процес, у якого в кожен момент часу ймовірність будь-якого стану в майбутньому залежить тільки від стану об'єкта в даний момент часу і не залежить від того, яким чином об'єкт прийшов до цього стану.

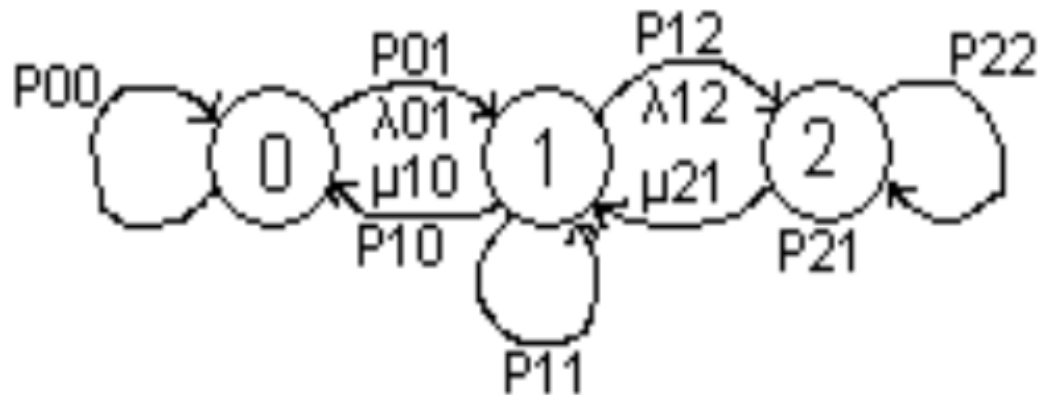


Марковський процес - це випадковий процес без наслідків. Моменти часу t_1 і t_2 - моменти переходу з одного стану в інший. Спосіб переходу об'єкта з одного стану в інший, що є найбільш оптимальним, це граф переходів.

$P_{ij}(\Delta t)$, $P_{ji}(\Delta t)$ - ймовірності переходу з одного стану в інший за деякий проміжок часу. Найважливіша характеристика Марківського процесу.

$P_{ii}(\Delta t)$ - ймовірність збереження стану протягом певного проміжку часу.

μ_{ij} , λ_{ij} - постійні інтенсивності прямого і зворотного переходу з одного стану за деякий проміжок часу.



Матриця ймовірності переходів

$$\|A\| = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}$$

$$P_{02}=P_{20}=0$$

Стан об'єкта в момент часу t

$$\overline{P(t)} = \begin{bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix}$$

Для моменту часу $t + \Delta t$ ймовірність стану

$$\overline{P(t + \Delta t)} = \begin{bmatrix} P_0(t + \Delta t) \\ P_1(t + \Delta t) \\ P_2(t + \Delta t) \end{bmatrix}$$

Транспонування матриці переходів

$$\overline{P(t + \Delta t)} = \overline{P(t)} \cdot A^T$$

Марковський однорідний процес - це процес, закономірність поведінки якого на будь-якому інтервалі часу $(t_2 - t_1)$ не залежить від положення того інтервалу на осі часу. Диференціальне рівняння можна скласти безпосередньо за графом переходів за таким правилом: *в лівій частині кожного рівняння записується $\frac{dP_i(t)}{dt}$, а в правій частині записується стільки членів,*

скільки стрілок пов'язано з цим станом.

Кожна складова дорівнює добутку інтенсивності переходів λ або μ , що переводить систему по даній стрілці на ймовірність того стану, з якого виходить стрілка. Знак перед кожним доданком залежить від напрямку переходу. Якщо стрілка входить в стан, то ставиться знак «+». Якщо виходить з стану, то ставиться знак «-». Виходить система рівнянь знаходження ймовірностей станів $P_0(T)$ і $P_1(T)$ змінюється за допомогою перетворення Лапласа, яке дозволяє перейти від диференціальних рівнянь до алгебраїчних.

2.2 ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ДИСКРЕТНИХ ВЕЛИЧИН

Гіпергеометричні закони

$$q_{nd} = \frac{C_D^d C_{N-D}^{n-d}}{C_N^n}$$

C_N^n - число способів узяття вибірки n

Математичне сподівання випадкової величини d дорівнює:

$$M[d] = nQ$$

$Q = D/N$ - ймовірність відмови в партії

$P = 1 - Q$ - ймовірність бездефектного виробу

Біноміальний закон

$$q_{nd} = C_n^d Q^d (1 - Q)^{n-d}$$
$$C_n^d = \frac{n!}{d! (n - d)!}$$

Математичне сподівання і дисперсія

$$M[d] = nQ$$
$$\sigma^2[d] = nQP$$

Закон Пуассона

$$q_{nd} = \frac{a^d}{d!} e^{-a}$$

$$a = nQ$$

d - число виробів, що відмовили у вибірці

Q - ймовірність відмови (витягнути неробочий виріб)

Математичне сподівання і дисперсія

$$M[d] = a$$

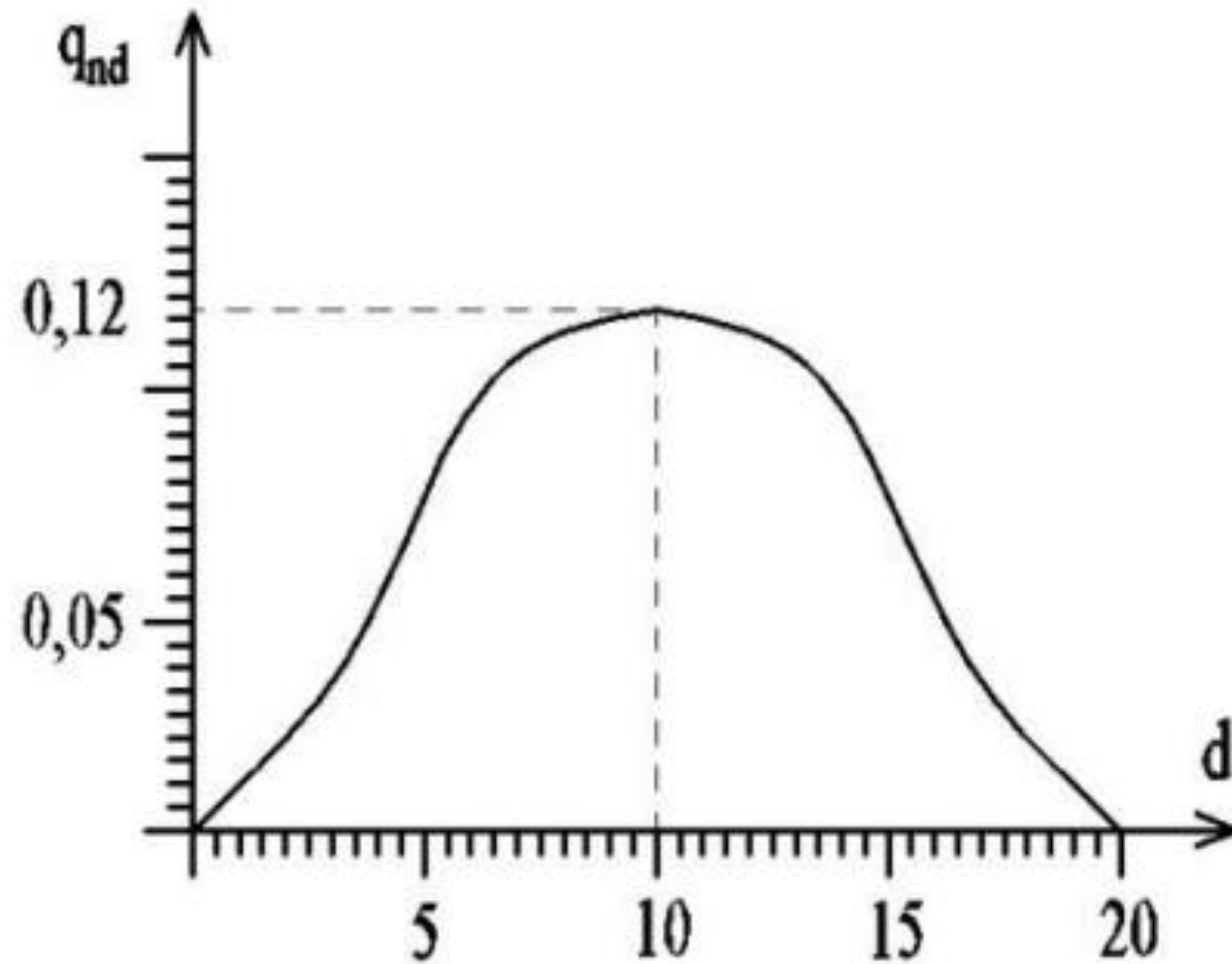
$$\sigma^2[d] = a$$

Коефіцієнт варіації, що характеризує розкид випадкової величини

$$V = \frac{\sigma[x]}{M[x]} = \frac{\sqrt{a}}{a} = \frac{1}{\sqrt{a}}$$

Особливість закону Пуассона:

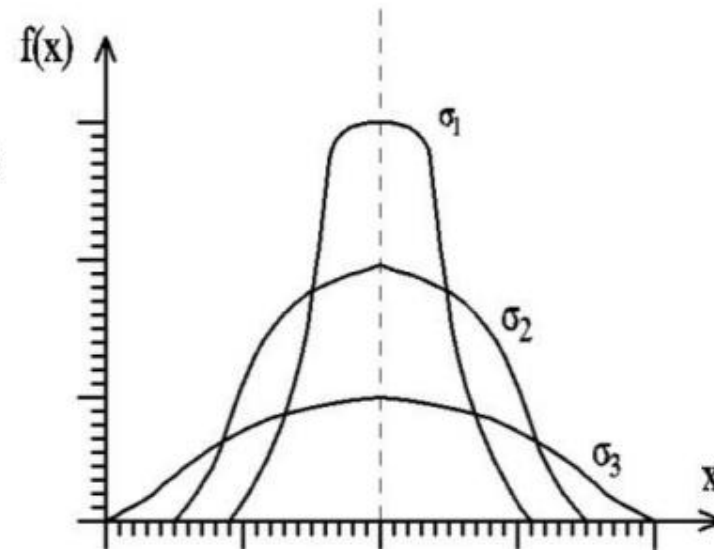
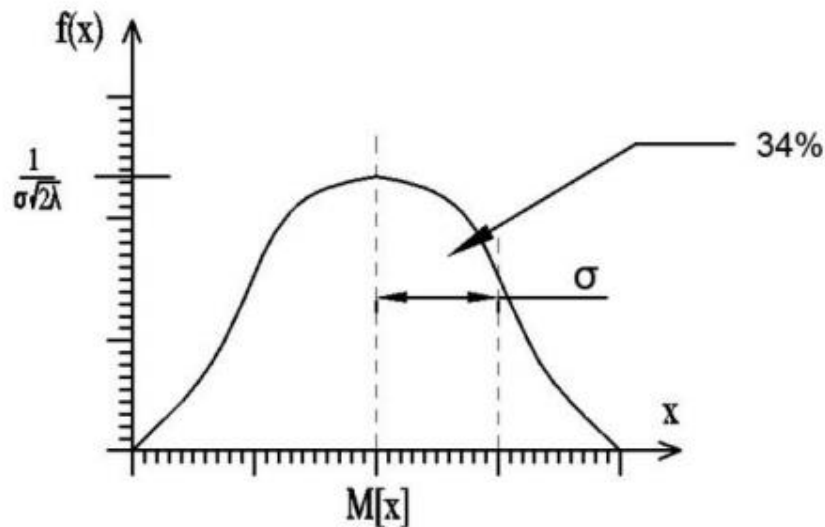
$$M[d] = \sigma^2[d]$$



2.3 ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ НЕПЕРЕРВНИХ ВЕЛИЧИН

Нормальний закон розподілу

Щільність ймовірності $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-M[x])^2}{2\sigma^2}}$



$$f_{\max}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \rightarrow f_{\max} \downarrow, \text{ если } \sigma \uparrow$$

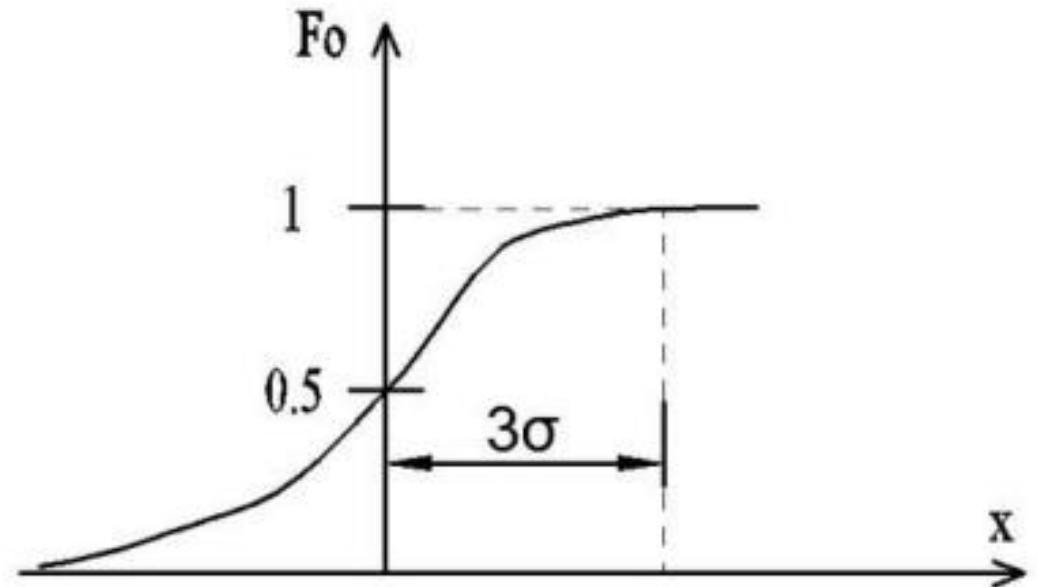
Для *центрованого і нормованого нормального розподілу*

$$M[x] = 0 \qquad \sigma = 1$$

$$f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

Інтегральний закон

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$



Стандартна таблиця для такої функції:

x	0	1	2	3
$F_0(x)$	0,5	0,841	0,9772	0,9986

$$F_0(-x) = 1 - F_0(x)$$

При довільному математичному сподіванні і σ *інтегральний розподіл*

$$F(x) = \frac{1}{\sigma} F_0\left(\frac{x - M[x]}{\sigma}\right)$$

Закон Вейбулла-Гнеденко

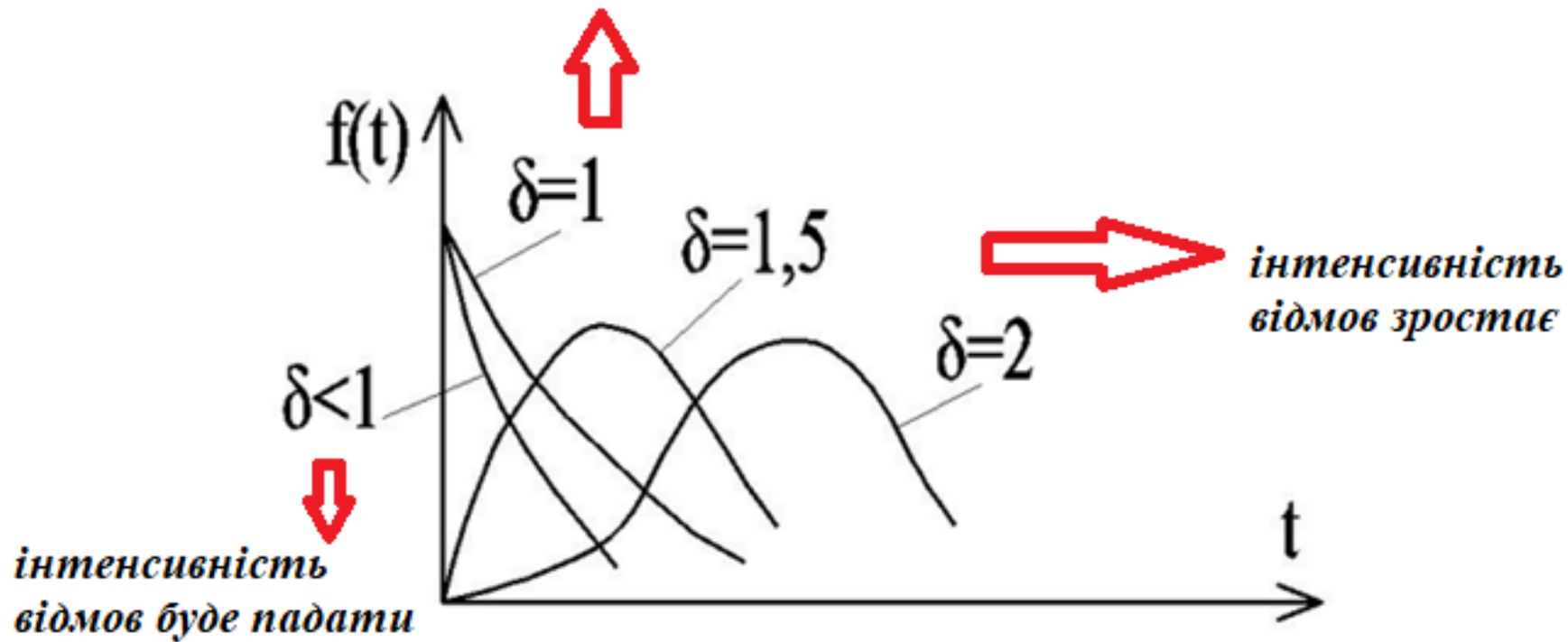
Для опису показників надійності напівпровідникових приладів, ІМС і інших елементів і вузлів апаратури на початковому етапі експлуатації часто використовується закон Вейбулла-Гнеденко, який характеризується двома параметрами

$t_0 = \frac{1}{\lambda_0}$ - параметром масштабу, що має сенс середнього напрацювання до першої відмови

δ - параметр форми

$$f(t) = \frac{\delta}{t_0} t^{\delta-1} e^{-\frac{t^\delta}{t_0}}$$

інтенсивність відмов буде постійна



Показники надійності для закону

При $\delta = 1$, $\lambda(0) = \lambda_0 = \frac{1}{t_0}$

$$p(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = e^{-\frac{t^\delta}{t_0}}$$

$$\lambda(t) = \frac{\delta}{t_0} e^{\delta-1}$$

Експоненційний закон або експоненціальний розподіл

$\lambda = \text{const:}$

$$p(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) = \exp(-\lambda t)$$

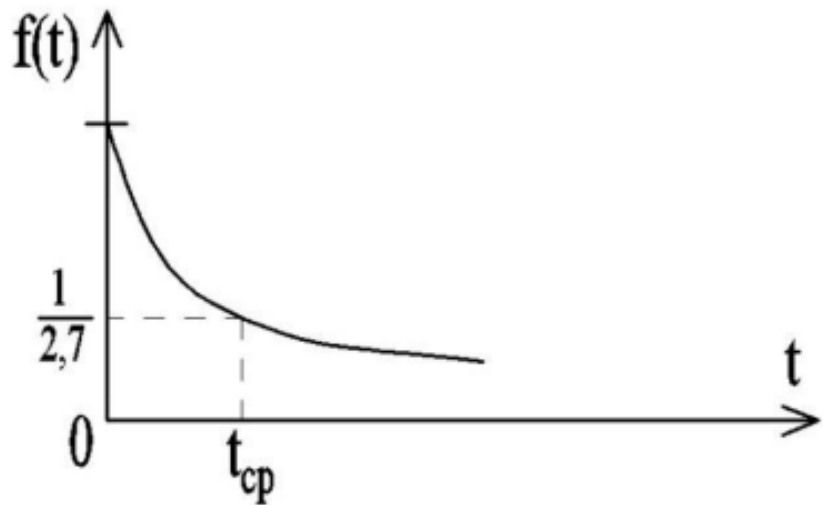
$\lambda(t) < 0,1:$

$$p(t) = 1 + -\frac{\lambda t}{1!} + \dots \cong 1 - \lambda t$$

Вірогідність відмови:

$$q(t) = 1 - p(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$$

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \lambda \exp(-\lambda t)$$



Середнє напрацювання до першої відмови

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} p(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda}$$

Інтегральний закон розподілу

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\lambda t}$$

Для експоненційного розподілу

$$\sigma^2(t) = \frac{1}{\lambda^2}$$

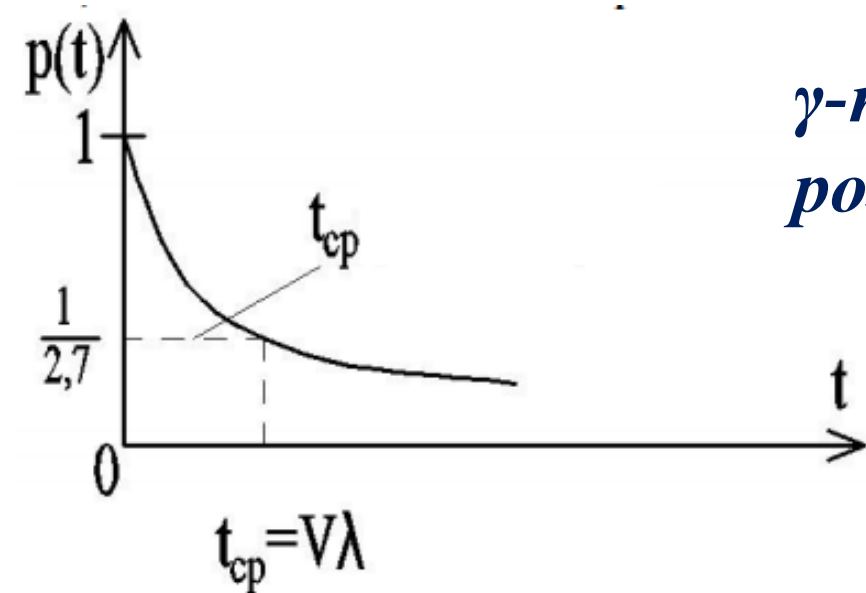
Коефіцієнт варіації

$$V = \frac{\sigma}{M} = 1$$

Особливості та застосування експоненціального розподілу при оцінці надійності

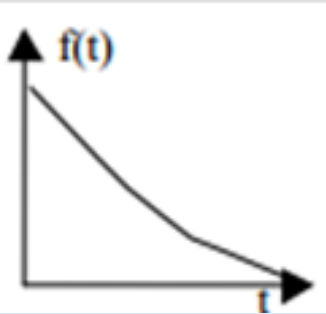
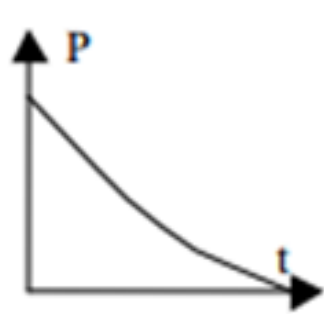
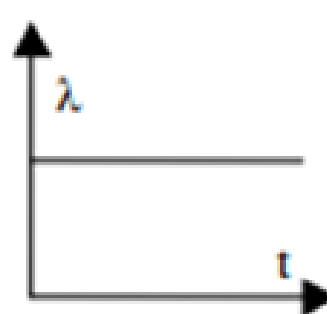
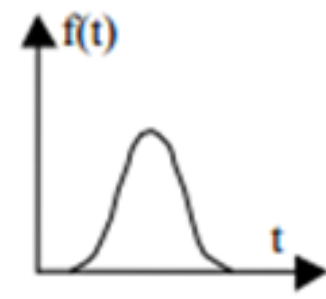
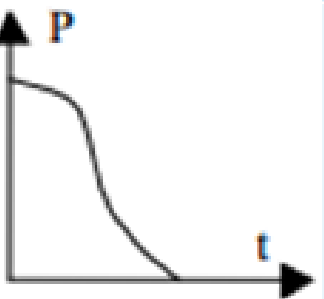
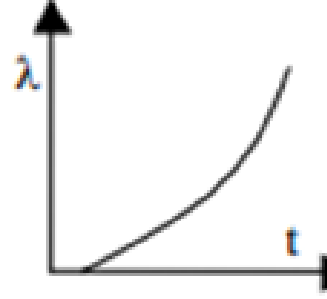
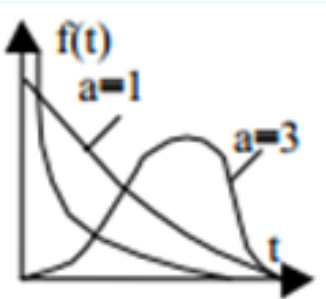
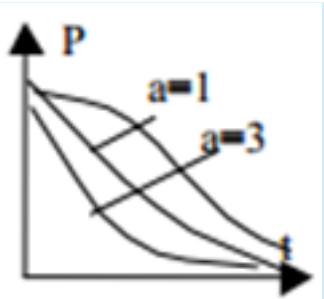
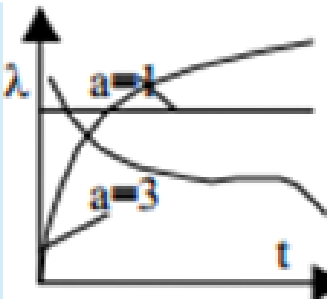
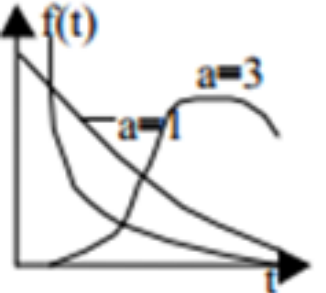
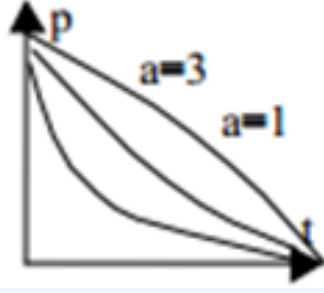
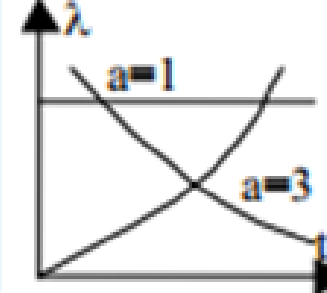
Головною особливістю експоненціального розподілу є незалежність показників надійності в даний момент часу від передісторії експлуатації приладу, якщо до цього моменту відмови не відбулося.

$$p(\Delta t) = \frac{p(t + \Delta t)}{p(t)} = \frac{\exp[-\lambda(t + \Delta t)]}{\exp[-\lambda t]} = \exp[-\lambda \Delta t]$$



γ -процентне напрацювання при експоненційному розподілі

$$p(t_\gamma) = \exp(-\lambda t_\gamma) = \frac{\gamma}{100} \rightarrow t_\gamma = -\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)$$
$$t_\gamma = t_{cp} \ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)$$

Тип розподілу	Розподіл відмов $f(t)$		Ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$		Інтенсивність відмов	
Експоненціальний розподіл						
Нормальний розподіл						
Гама-розподіл						
Розподіл Вейбула						

Приклад. Припустимо гамма дорівнює 90%, що означає що не менше 90% приладів всієї сукупності повинні безвідмовно працювати протягом t_γ ,

$$p(t_\gamma) = 0,9 \quad t_{90} = t_{\text{ср}} \ln \left(\frac{100}{90} \right) = 0.105 t_{\text{ср}}$$

$$\text{при } p(t_\gamma) = 0,99, \quad t_{99} = t_{\text{ср}} \ln \left(\frac{100}{99} \right) = 0.01 t_{\text{ср}}.$$

$$\text{при } p(t_\gamma) = 0,999, \quad t_{99,9} = t_{\text{ср}} \ln \left(\frac{100}{99,9} \right) = 0.001 t_{\text{ср}}.$$

За умови $\lambda = 10^{-7} \text{ год.}^{-1}$

$$\text{при } \gamma = 99,9\% \quad , \quad p(t_\gamma) = 0,999$$

$$t_{99,9} = \frac{1}{\lambda} 0,001 = 10^4 \text{ год.}$$

В апаратурі проте, що використовує велику кількість елементів, ймовірності безвідмовної роботи елемента перемножуються за теоремою множення ймовірностей. Якщо ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента підпорядковується експоненціальному закону, то ймовірність безвідмовної роботи апаратури дорівнює добутку цих експонент:

$$P_A = \exp(-\lambda_1 t) \cdot \dots \cdot \exp(-\lambda_n t) = \exp(-\lambda t)$$
$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$$

$$n=100, \lambda_e=10^{-7}$$
$$\lambda_A = n\lambda_e = 10^{-4} \text{ год.}^{-1}$$
$$t_{\text{ср}A} = \lambda_A^{-1} = 1 \cdot 10^4 \text{ год.}$$

$$\gamma = 99,9\%$$
$$t_\gamma = 0,001,$$
$$t_{\text{ср}A} = 10 \text{ год.}$$

2.4 ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ АПАРАТУРИ

Шляхи підвищення надійності апаратури зосереджені в трьох напрямках:

1. Схема технічні та системні, що передбачають використання приладів в полегшених електричних і теплових режимах, а також поелементне, по блоках і апаратне резервування.
2. Підвищення надійності комплектуючих елементів.
3. Збільшення ступеня інтеграції мікросхем з одночасним підвищенням або хоча б збереженням їх надійності, що дає ефект в трьох напрямках: зниження кількості елементів в апаратурі; скорочення числа межелементних з'єднань в блоках; зосередження в одній мікросхемі функцій багатьох елементів, що дозволяє оптимізувати схемотехнику пристроїв і підвищити їх надійність.

Композиція розподілів

Нехай є ряд незалежних випадкових величин

$$X_1, X_2 \dots X_n$$

з щільностями ймовірностей

$$f_1(x_1), f_2(x_2) \dots f_n(x_n)$$

Та є випадкова величина Y , що є сумою величин $X_1 + X_2 + \dots + X_n$

Властивості композиції

$$1. M[Y] = M[X_1] + \dots + M[X_n]$$

$$2. \sigma^2[Y] = \sigma^2[x_1] + \dots + \sigma^2[x_2]$$

З цих властивостей випливає *два слідства*:

1. Якщо дисперсії всі рівні і математичні очікування є рівними:

$$\sigma^2[x_1] = \dots = \sigma^2[x_n]$$

$$M[x_1] = \dots = M[x_n]$$

$$\sigma^2[Y] = n\sigma^2[x]$$

$$M[Y] = nM[x]$$

Як видно з ростом n варіація зменшується, тобто міра точності збільшується пропорційно $\sqrt{n}$

2. В результаті композиції вплив на сумарну дисперсію випадкової величини, що має меншу дисперсію практично зникає.

Приклад. $Y = x_1 + x_2; \sigma^2[x_1] = 0,01; \sigma^2[x_2] = 1$

Тоді з другого слідства: $\sigma^2[Y] = 1,01$

а середньоквадратична композиція: $\sigma[Y] = 1,005 \cong \sigma[x_2]$

Приватні властивості композиції застосовні до конкретного виду законів розподілу. Наприклад, в результаті композиції експоненційних законів, новий експоненційний розподіл не виходить. Той же результат ми б отримали для всіх законів крім закону Пуассона і нормального закону. При великій кількості розподілів випадкових величин будь-якої природи дисперсіями, що з не сильно відрізняються і математичними очікуваннями, композиція буде близька до нормальних. Це визначається граничною теоремою теорії ймовірностей.

Суперпозиція розподілів

Суперпозиція розподілів зустрічається коли партія однотипних виробів складається з виробів, виготовлених з різних партій сировини або на різних технологічних лініях.

$$f(t) = C_1 f_1(t) + C_2 f_2(t)$$

C_1 і C_2 - вагові коефіцієнти, тобто ймовірність знаходження виробу в партії

$$C_1 = \frac{n_1}{N}$$

$$C_2 = \frac{n_2}{N}$$

Приклад математичного представлення всій λ -характеристики(кривої життя).

Припустимо, що партія виробів складається з трьох груп, відмови в яких обумовлені різними причинами 1,2,3. Закони розподілу на цих ділянках будуть різними, тому для подання загального сумарного розподілу використовують суперпозицію законів розподілу.

$$f(t) = C_1 f_1(t) + C_2 f_2(t) + C_3 f_3(t)$$

$$C_i = \frac{n_i}{N}$$

$$N = n_1 + n_2 + n_3$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1$$

У загальному вигляді крива інтенсивності відмов представляється за основною формулою теорії надійності:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} = \frac{C_1 f_1(t) + C_2 f_2(t) + C_3 f_3(t)}{1 - \int_0^\infty (C_1 f_1(t) + C_2 f_2(t) + C_3 f_3(t)) dt}$$

Суперпозиція

$$f(t) = C_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}$$

$$\lambda_1 < \lambda_2$$

$$C_1 + C_2 = 1$$

де λ_1 відповідає ділянці нормальної експлуатації.

Тоді інтенсивність відмов можна представити таким чином:

$$\lambda(t) = \frac{C_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}}$$

Спростимо для двох граничних випадків. Для початку експлуатації коли $t \approx 0$:

$$\lambda(t) \cong \frac{C_1 \lambda_1 + C_2 \lambda_2}{C_1 + C_2} = C_1 \lambda_1 + C_2 \lambda_2$$

$$e^{-\lambda_2 t} \rightarrow 0, \quad \lambda(t) \cong \lambda_1$$

Між двома цими крайніми виразами буде працювати формула

$$\lambda(t) = \frac{C_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}}$$

Середній час напрацювання до першої відмови

$$t_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} p(t) dt = \frac{C_1}{\lambda_1} + \frac{C_2}{\lambda_2}.$$

Якість виробництва характеризується відношенням

$$\frac{\lambda(0)}{\lambda(\infty)} = \frac{C_1 \lambda_1 + C_2 \lambda_2}{\lambda_1}$$

Це відношення має бути невеликим. Для складних радіоелектронних пристроїв відношення дорівнює $\approx 2-2,5$, що прийнятно. Очевидно, що чим більше початкова інтенсивність відмов і чим швидше вона зменшується з часом, тим гірше виробництво і отже необхідно постановка апаратури на тренування або вдосконалення виробництва.

Для врахування впливу поступових відмов в період старіння використовують суперпозицію експоненційного і усіченого нормального розподілу, тому що для нього інтенсивність відмов зростає.

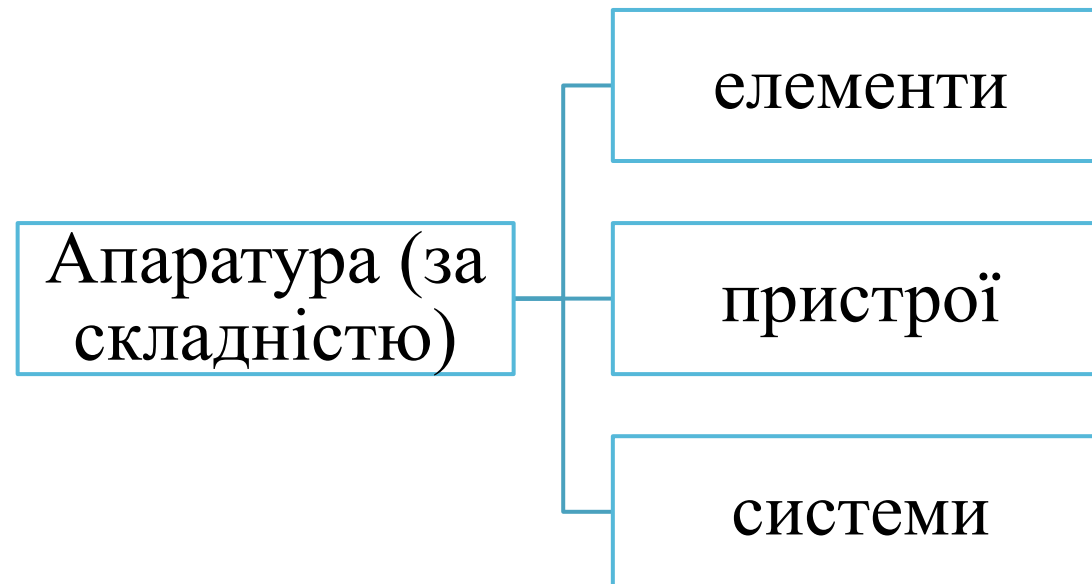
Тема №3. Основні показники надійності електронних пристроїв та систем

ПЛАН

- 3.1 Класифікація електронної апаратури. Поняття елемента і системи*
- 3.2 Моделі надійності*
- 3.3 Показники надійності*

3.1 КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ. ПОНЯТТЯ ЕЛЕМЕНТА І СИСТЕМИ

Електронна апаратура - це сукупність виробів, в яких застосовуються електровакуумні напівпровідникові і мікроелектронні прилади. Для зручності аналізу надійності електронну апаратуру можна класифікувати за складністю, способу застосування і призначення.



Елементом називається деталь, яка самостійно не застосовується, не розбирається і не ремонтується. До елементів відносяться радіолампи, напівпровідникові прилади, ІМС, резистори, конденсатори, реле, перемикачі, роз'єми пайки.

За функціями, що виконуються, елементи поділяють на **основні** та **допоміжні**:

- основні входять до принципової схеми
- допоміжні не входять до принципової схеми, наприклад роз'єми, власники, панелі.

Пристрій називається сукупність елементів, об'єднаних в закінчену технічну конструкцію, що мають самостійне експлуатаційне призначення. Наприклад, в радіолокаційної станції пристроями є приймач, передавач і індикаторний пристрій.

Система – сукупність пристроїв або об'єктів, призначених для виконання заданих функцій.

Поняття система є умовним, тому що в неї можуть входити різні сукупності об'єктів. Як систем можуть розглядатися інформаційно-вимірювальні системи, вимірювально-обчислювальні комплекси, електронні обчислювальні машини, радіолокаційні станції, автоматичні системи управління. Між пристроями і системами може відсутні відмінність, тому що їх також необхідно розглядати як системи

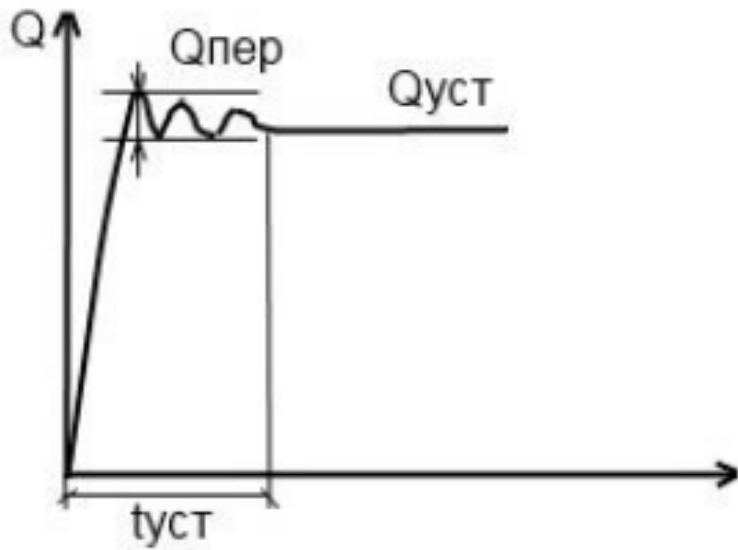
У *теорії надійності* під *елементом* розуміють частину системи, яка має самостійну характеристику надійності, яка використовується під час розрахунків, тобто елемент системи є елементом розрахунку надійності в структурній схемі розрахунку надійності. Найпростішою схемою є послідовна.

Всі елементи, які використовуються в системах можна розділити на *первинні*, наприклад електро-радіо елементи, і елементи, що складаються з первинних, наприклад підсилювачі, генератори.

Характеристики надійності первинних елементів визначають *шляхом проведення випробувань або з досвіду експлуатації*.

Залежно від принципів роботи первинні елементи можна розділити на *механічні* (перемикачі, кнопки, редуктори), *електромеханічні* (електродвигуни) і *електронні*. Визначення технічної системи не виключає введення в неї людини, наприклад оператор виробництва або пілот літака.

Для різних технічних систем поняття відмови має свій сенс. Наприклад, для систем автоматичного регулювання та керування важливо вимога стійкості системи і якість перехідного процесу.



Графік зміни регульованого параметра в часі.

Параметрами перехідного процесу є перерегулювання і час встановлення. Якщо ці параметри будуть перевищувати задані значення, то настає відмова системи.

Для технічних систем надійність є складовою частиною більш широкого поняття ефективності.

Ефективність — це властивість системи виконувати задані функції з необхідною якістю, яке визначається точністю, перешкода-захищеністю і іншими характеристиками.

В цілях забезпечення надійності в технічних системах використовують введення надмірності.

Надмірність - це додатковий засіб і можливості понад мінімально необхідних для виконання системи заданих функцій.

Резервування - метод підвищення надійності, шляхом введення надмірності.

Апаратура (за способом застосування)

Разової дії

Апаратура разової дії є невідновлювальною (зонди, супутники). Поняття відновлюваність пов'язано з її зберіганням і транспортуванням.

Чергова

Чергова апаратура є апаратурою багаторазової дії. Наприклад вимірювальна, апаратура зв'язку, інформаційно-вимірювальні системи. Її відновлення здійснюється між періодами використання.

Безперервно-працююча

Безперервно-працююча апаратура використовується протягом доби, або в протягом часу встановленого розпорядку (навігаційна апаратура, автоматичні системи управління рухом суден і технологічних процесів, вимірювально-обчислювальні комплекси).



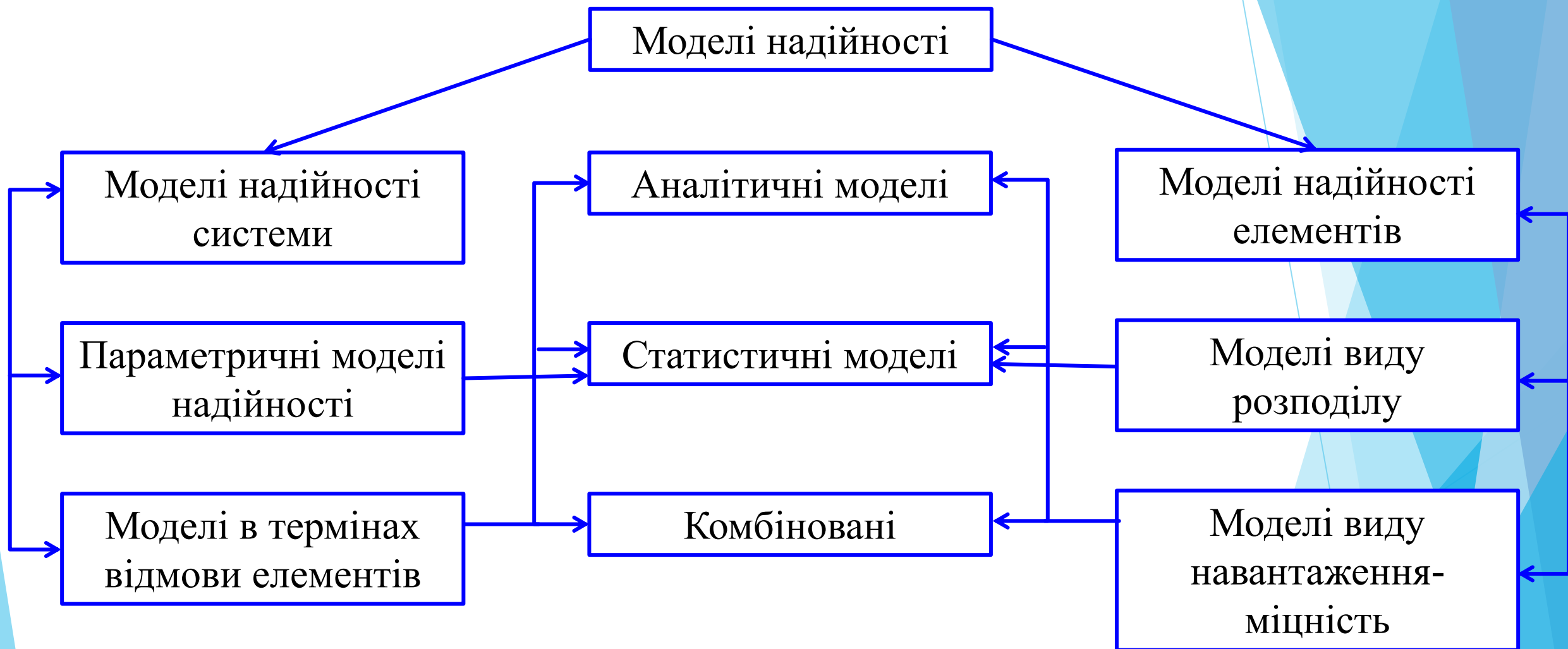
В електронні системи входять системи, елементами яких є електронно-вакуумні, напівпровідникові і мікроелектронні прилади. Ці системи в свою чергу поділяються за принципом вихідного ефекту: *системи управління, інформаційно-вимірювальні, обчислювальні* та інші.

3.2 МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ

Розрізняють *моделі надійності елементів (МНЕ)* і *моделі надійності систем (МНС)*.

МНЕ розробляються з метою формалізованого опису процесів виникнення відмов елементів в часі. Залежно від діючих навантажень і внутрішніх властивостей елементів.

МНС розробляються для формального опису з позиції надійності процесу функціонування системи як процесу взаємодії її елементів при виконанні поставленого завдання.



Моделі типу *навантаження-міцність* розглядаються як випадкова подія, відповідне визначеному перевищенні навантаження над міцністю.

Моделі типу розподілу часу будуються за статистичними даними, за якими визначаються вид і параметри закону розподілу.

Параметричні моделі будуються для поступових відмов.

Моделі в термінах відмов елементів є основними.

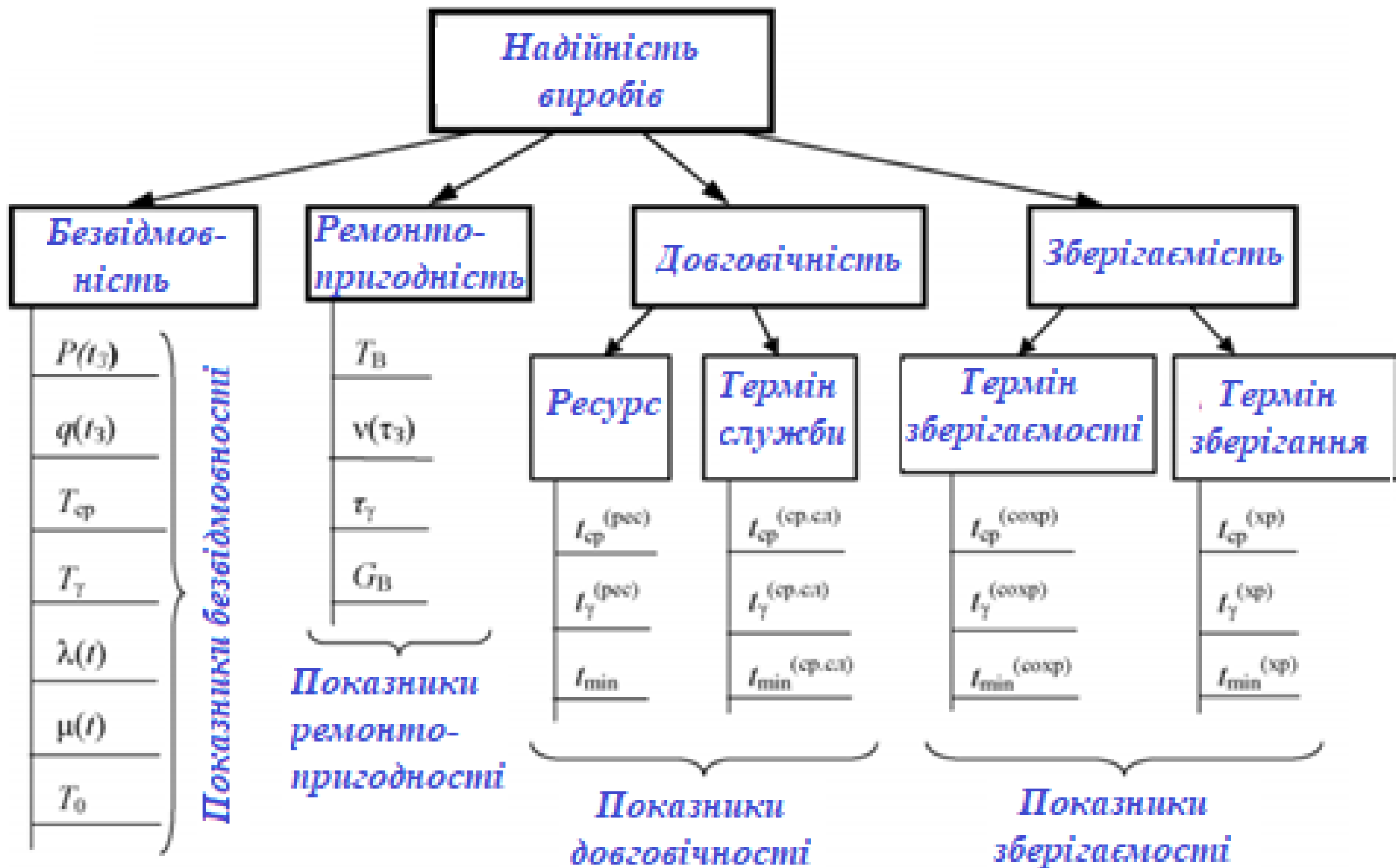
3.3 ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ

Раціональне управління надійністю може бути здійснено тільки за умови її кількісної оцінки, так як застосування чисельних методів - одна з найважливіших передумов правильності прийнятих керуючих впливів.

Для кількісної оцінки надійності застосовуються **показники (критерії) надійності**, які являють собою кількісну характеристику одного або декількох властивостей, складових надійності об'єкта. При цьому для оцінки певного властивості надійності можуть вводитися один або кілька показників. Отже, для кількісної оцінки надійності необхідно мати сукупність показників.

Розрізняють *одиничний показник надійності*, коли він характеризує одне з властивостей, складових надійності, і комплексний показник, що відноситься до кільком властивостями надійності.

Показники надійності пов'язані з випадковими подіями-відмовами і відновленнями об'єктів. На практиці визначаються статистичні показники надійності. Однак зі зростанням числа випробовуваних об'єктів вони будуть сходиться до аналогічних імовірнісних показників. Як правило, всі розрахунки надійності виробів і систем на стадії проектування виконуються у вигляді імовірнісних розрахунків. Крім того, багато показників надійності зрозуміліше визначаються в імовірнісних термінах, а не в статистичних.



Показники
безвідмовності

$P(t_3)$ - ймовірність безвідмовної роботи за заданий час t_3

$q(t_3)$ - ймовірність відмови за заданий час t_3

T_{cp} – середнє напрацювання до відмови. Якщо напрацювання приймається у вигляді часового значення, то показник – середній час безвідмовної роботи

T_γ – гама-процентне напрацювання до відмови ($\gamma \geq 90\%$)

$\lambda(t)$ – інтенсивність відмов, в загальному випадку є функцією часу.

T_0 – середнє напрацювання на відмову (фізичний сенс має лише для відновлюючих РЕП)

Показники
ремонтпригодності

T_B – середній час відновлення РЕП (математичне очікування часу відновлення)

$\nu(\tau_3)$ – ймовірність відновлення РЕП за заданий час τ_3

τ_γ – гама-процентний час відновлення ($\gamma \geq 90\%$)

G_B – середні витрати на відновлення РЕП (грошові витрати на відновлення працездатності РЕП)

Показники
довговічності

$t_{\text{ср}}^{(\text{рес})}$ – середній ресурс виробу (математичне очікування ресурсу виробу, що розглядається)

$t_{\gamma}^{(\text{рес})}$ – гама-процентний ресурс ($\gamma \geq 90\%$)

$t_{\min}$ – мінімальне напрацювання (характеризує ресурсні можливості виробів $t_{\min}$ відповідає $t_{\gamma}^{(\text{рес})}$ при $\gamma = 99,99\%$)

$t_{\text{ср}}^{(\text{стр.сл.})}$ – середній строк служби виробу (математичне очікування строку служби виробу, що розглядається)

$t_{\gamma}^{(\text{стр.сл.})}$ – гама-процентний строк служби ($\gamma \geq 90\%$)

$t_{\min}^{(\text{стр.сл.})}$ – мінімальний строк служби ($t_{\min}^{(\text{стр.сл.})}$ відповідає $t_{\gamma}^{(\text{стр.сл.})}$ при $\gamma = 99,99\%$)

Показники зберігаємості

$t_{\text{ср}}^{(\text{збер})}$ – середній термін зберігаємості (математичне очікування терміну зберігаємості виробу, що розглядається)

$t_{\gamma}^{(\text{збер})}$ – гама-процентний термін зберігаємості ($\gamma \geq 90\%$)

$t_{\text{min}}^{(\text{зб})}$ – мінімальний термін зберігаємості ($t_{\text{min}}^{(\text{збер})}$ відповідає $t_{\gamma}^{(\text{збер})}$ при $\gamma=99,99\%$)

$t_{\text{ср}}^{(\text{зб})}$ – середній термін зберігання виробу (математичне очікування терміну зберігання виробу, що розглядається)

$t_{\gamma}^{(\text{зб})}$ – гама-процентний термін зберігання ($\gamma \geq 90\%$)

$t_{\text{min}}^{(\text{зб})}$ – мінімальний термін зберігання ($t_{\text{min}}^{(\text{зб})}$ відповідає $t_{\gamma}^{(\text{зб})}$ при $\gamma=99,99\%$)

Тема №4. Методи розрахунку надійності електронних систем

ПЛАН

4.1 Класифікація методів розрахунку надійності електронних систем

4.2 Алгоритм розрахунку надійності систем

4.1 КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

За основними принципами розрахунку властивостей, що становлять надійність, або комплексних показників надійності об'єктів розрізняють: методи прогнозування, структурні методи розрахунку, фізичні методи розрахунку.

Методи прогнозування засновані на використанні для оцінки очікуваного рівня надійності об'єкта даних про досягнуті значення та виявлені тенденції вимірювання показників надійності об'єктів-аналогів.

Об'єкти-аналогови – це об'єкти аналогічні або близькі до розглянутого за призначенням, принципів дії, схемно-конструктивної побудови та технології виготовлення, елементної бази та застосовуваних матеріалів, умов і режимів експлуатації, принципів та методів управління надійністю.

Структурні методи розрахунку засновані на представленні об'єкта у вигляді логічної (структурно-функціональної) схеми, що описує залежність станів і переходів об'єкта від станів і переходів його елементів з урахуванням їх взаємодії та виконуваних ними функцій в об'єкті з наступними описами побудованої структурної моделі адекватною математичною моделлю і обчисленням показників надійності об'єкта за відомими характеристиками надійності його елементів.

Фізичні методи розрахунку засновані на застосуванні математичних моделей, описують їх фізичні, хімічні та інші процеси, що призводять до відмов об'єктів (до досягнення об'єктами граничного стану), та обчислення показників надійності за відомими параметрами (завантаженості об'єкта, характеристиками застосованих в об'єкті речовин та матеріалів з урахуванням особливостей його конструкції та технологій виготовлення).

Методи розрахунку надійності конкретного об'єкта вибирають залежно від:

- цілей розрахунку та вимог до точності визначення показників надійності об'єкта;
- наявності та/або можливості отримання вихідної інформації, необхідної для застосування певного методу розрахунку;
- рівня відпрацьованості конструкції та технології виготовлення об'єкта, системи його технічного обслуговування та ремонту, що дозволяє застосовувати відповідні розрахункові моделі надійності.

При розрахунку надійності конкретних об'єктів можливе одночасне застосування різних методів, наприклад, методів прогнозування надійності електронних та електротехнічних елементів з подальшим використанням отриманих результатів як вихідні дані для розрахунку надійності об'єкта в цілому або його складових частин різними структурними методами.

Методи прогнозування застосовують:

- для обґрунтування необхідного рівня надійності об'єктів при розробці технічних завдань та/або опіки ймовірності досягнення заданих показників надійності при опрацюванні технічних пропозицій та аналізі вимог технічного завдання (контракту);
- для орієнтовної оцінки щоденного рівня надійності об'єктів на ранніх стадіях їх проектування, коли відсутня необхідна інформація для застосування інших методів розрахунку надійності;
- для розрахунку інтенсивності відмов серійно випускаються та нових електронних та електротехнічних елементів різних типів з урахуванням рівня їх навантаженості, якості виготовлення, областей застосування апаратури, в якій використовуються елементи;
- для розрахунку параметрів типових завдань та операцій технічного обслуговування та ремонту об'єктів з урахуванням конструктивних характеристик об'єкта, що визначають його ремонтпридатність.

Для прогнозування надійності об'єктів застосовують:

- методи евристичного прогнозування (експертної оцінки);
- крейди прогнозування за статистичними моделями;
- Комбіновані методи.

Методи евристичного прогнозування засновані на статистичній обробці незалежних оцінок значень очікуваних показників надійності об'єкта (індивідуальних прогнозів), що даються групою кваліфікованих (експертів) на основі наданої їм інформації про об'єкт, умови його експлуатації, заплановані технології. Опитування експертів та статистичну обробку індивідуальних прогнозів показників надійності проводять загальноприйнятими при експертній оцінці будь-яких показників якості методами (наприклад, метод Дельфі).

Методи прогнозування за статистичними моделями засновані на екстра- або інтерполяції залежностей, що описують виявлені тенденції зміни показників надійності об'єктів-аналогів з урахуванням їх конструктивно-технологічних особливостей та інших факторів, інформація про які для об'єкта, що розробляється, виснажена або може бути отримана в момент проведення оцінки. Моделі для прогнозування будують за даними про показники надійності та параметри об'єктів-аналогів з використанням відомих статистичних методів (багатофакторного регресійного аналізу, методів статистичної класифікації та розпізнавання образів).

Комбіновані методи ґрунтуються на спільному застосуванні для прогнозування надійності методів прогнозування за статистичними моделями та евристичних методів з подальшим порівнянням результатів. При цьому евристичні методи використовують для оцінки можливості екстраполяції статистичних моделей і уточнення прогнозу за ними показників надійності. Застосування комбінованих методів доцільно у випадках, коли є підстави очікувати якісних змін рівня належності об'єктів, що не відображаються відповідними статистичними моделями, або при недостатньому для застосування тільки статистичних методів числі об'єктів-аналогів.

Структурні методи є основними методами розрахунку показників безвідмовності, ремонтпридатності та комплексних показників надійності в процесі проектування об'єктів, що піддаються на елементи, характеристики надійності яких у момент проведення розрахунків відомі або можуть бути визначені іншими методами (прогнозування, фізичними, за статистичними даними, зібраними в процесі їх застосування в аналогічних умовах). Ці методи застосовують також для розрахунку довговічності та збереження об'єктів, критерії граничного стану яких виражаються через параметри довговічності (збереженості) їх елементів.

Розрахунок показників надійності структурними методами у випадку включає:

- подання об'єкта у вигляді структурної схеми, що описує логічні співвідношення між станами елементів та об'єкта в цілому з урахуванням структурно-функціональних зв'язків та взаємодії елементів, прийнятої стратегії обслуговування, видів та способів резервування та інших факторів;
- опис побудованої структурної схеми надійності об'єкта адекватної математичної моделі, що дозволяє в рамках введених припущень і припущень обчислити показники надійності за даними про надійність його елементів у умовах їх застосування.

В якості структурних схем надійності можуть застосовуватися:

- структурні блок-схеми надійності, які представляють об'єкт як сукупності певним чином з'єднаних (у сенсі надійності) елементів;
- дерева відмов об'єкта, що представляють графічне відображення причинно-наслідкових зв'язків, що зумовлюють певні види його відмов;
- графи (діаграми) станів і переходів, що описують можливі стани об'єкта та його переходи з одного стану в інший у вигляді сукупності станів і переходів його елементів.

Математичні моделі, що застосовуються для опису відповідної структурної схеми надійності, визначаються видами та складністю зазначених структур, прийнятими припущеннями щодо видів законів розподілу характеристик надійності елементів, точністю та достовірністю вихідних даних для розрахунку та іншими факторами.

Методи розрахунку безвідмовності невідновлюваних об'єктів виду І:

Як правило, для опису безвідмовності таких об'єктів застосовують блок-схеми безвідмовності, правила складання та математичного опису стандартів. Зокрема, стандартом встановлено:

- *методи прямого розрахунку ймовірності безвідмовної роботи об'єкта* (ВБР) за відповідними параметрами безвідмовності елементів для найпростіших паралельно-послідовних структур;
- *методи розрахунку ВБР для складніших структур*. Що відносяться до класу монотонних, включаючи метод прямого перебору станів, метод мінімальних шляхів та перерізів, метод розкладання щодо будь-якого елемента.

Для розрахунку показників типу середнього напрацювання об'єкта повністю у зазначених методах використовують метод прямого або чисельного інтегрування розподілу напрацювання повністю об'єкта, що представляє композицію відповідних розподілів напрацювань повністю його елементів. Якщо інформація про розподіл напрацювань повністю неповна або недостовірна, то застосовують різні граничні оцінки показників надійності об'єкта, відомі з теорії надійності.

В окремому випадку невідновлюваної системи з різними способами резервування і при експоненційному розподілі напрацювань до відмови елементів застосовують її структурне відображення у вигляді графа переходів та його математичний опис за допомогою марківського процесу.

Методи розрахунку безвідмовності та комплексних показників надійності невідновлюваних об'єктів виду І:

Універсальним методом розрахунку для об'єктів будь-якої структури та за будь-яких перерізів розподілів напрацювань між відмовами та часом відновлення елементів, за будь-яких стратегій та методів відновлення та профілактики служить метод статистичного моделювання, що в загальному випадку включає:

- синтез формальної моделі (алгоритму) формування послідовності випадкових подій, що відбуваються в процесі роботи об'єкта (відмов, відновлень, перемикань на резерв, початку та кінця технічного обслуговування);
- розробку програмного забезпечення для реалізації на ЕОМ складеного алгоритму та розрахунку показників надійності об'єкта;
- проведення імітаційного експерименту на ЕОМ шляхом багатократної реалізації формальної моделі, що забезпечує необхідну точність та достовірність розрахунку показників надійності.

Метод статистичного моделювання для розрахунку надійності
застосовують за відсутності адекватних аналітичних моделей з числа, що розсмоктуються нижче.

Для резервованих послідовних структур із відновленням н довільними способами резервування елементів застосовують марківські моделі для опису відповідних графів (діаграм) станів.

У деяких випадках для об'єктів з експонентними розподілами напрацювань і часу відновлення немарківська задача розрахунку показників надійності може бути зведена до марківської шляхом введення певним способом фіктивних станів об'єкта в його граф переходів.

Інший ефективний метод розрахунку показників надійності об'єктів з резервом заснований на представленні напрацювань їх між відмовами у вигляді суми випадкової кількості випадкових доданків та безпосереднім обчисленням показників надійності об'єктів без залучення методів теорії випадкових процесів.

Методи розрахунку показників ремонтпридатності.

Методи розрахунку показників ремонтпридатності в загальному випадку засновані на представленні процесу технічного обслуговування або ремонту визначеного виду як сукупності окремих завдань (операцій), ймовірності та мети виконання яких визначаються показниками безвідмовності (довговічності) об'єктів та прийнятою стратегією технічного обслуговування та ремонту, а продовжувач трудомісткість, вартість виконання кожного завдання залежить від конструктивної пристосованості об'єкта до технічного обслуговування (ремонту) даного виду.

При розрахунку показників ремонтпридатності об'єктів при поточному неплановому ремонті розподіл часу (трудомісткості, вартості) його відновлення представляє композицію розподілів витрат на окремі завдання відновлення з урахуванням очікуваної ймовірності виконання кожного завдання за певний період роботи об'єкта. Зазначені ймовірності можуть бути розраховані, наприклад, за допомогою дерев відмов, а параметри розподілу витрат на виконання окремих завдань розраховують одним із методів (нормативно-коефіцієнтним за регресійними моделями н ін.).

Загальна схема розрахунку включає:

- складання переліку можливих відмов об'єкта та оцінку їх ймовірностей (інтенсивностей);
- відбір зі складеного списку шляхом розшарованої випадкової вибірки деякого досить представницького числа завдань і розрахунок параметрів розподілу їх тривалості (трудомісткості, вартості). В якості таких розподілів зазвичай використовують усічений нормальний або альфа-розподіл,
- побудова емпіричного розподілу витрат на поточний ремонт об'єкта шляхом складання з урахуванням ймовірностей відмов розподілу витрат на окремі завдання та його згладжування за допомогою відповідного теоретичного розподілу (логарифмічно-нормального чи гамма-розподілу);
- обчислення показників ремонтпридатності об'єкта за параметрами обраного закону розподілу.

Методи розрахунку показників надійності об'єктів виду II.

Для об'єктів даного виду застосовують показники надійності типу «коефіцієнт збереження ефективності» ($К_{ef}$), при розрахунку якого зберігаються загальні принципи розрахунку надійності об'єктів виду I, але кожному стану об'єкта, що визначається сукупністю станів його елементів або кожної можливої його траєкторії в просторі станів елементів, бути поставлене у відповідність певне значення частки номінальної ефективності, що зберігається від 0 до 1 (для об'єктів виду I ефективність в будь-якому стані може приймати тільки два можливих значення: 0 іди 1).

Існує *два основні методи розрахунку $К_{ef}$* :

- *метод усереднення за станами* (аналог методу прямого перебору станів), що застосовується для об'єктів короткочасної дії, що виконують завдання, тривалість яких така, що ймовірність зміни стану об'єкта в процесі виконання завдання можна знехтувати і враховувати тільки його початковий стан;
- *метод усереднення по траєкторіях*, що застосовується для об'єктів тривалої дії, тривалість виконання завдань якими така, що не можна знехтувати ймовірністю зміни станів об'єкта при їх виконанні за рахунок відмов та відновлення елементів. У цьому процес функціонування об'єкта описується реалізацією однієї з можливих траєкторій просторі станів.

Відомі також деякі окремі випадки розрахункових схем для визначення K_{ef} , що застосовуються для систем з певними видами функції ефективності, наприклад:

- системи з адитивним показником ефективності, кожен елемент яких вносить поперілий незалежний внесок та вихідний ефект від застосування системи;
- системи з мультиплікативним показником ефективності, одержуваним як добуток відповідних показників ефективності підсистем;
- системи з резервуванням функцій;
- системи, що виконують завдання кількома можливими способами з використанням різних поєднань елементів, що беруть участь у виконанні задачі кожним з них;
- симетричні розгалужені системи;
- системи з зонами дії, що перетинаються, та ін.

У всіх перерахованих вище схемах K_{ef} системи є функцією K_{ef} її підсистем або показниками надійності елементів.

Найбільш важливим моментів у розрахунках K_{ef} є оцінка ефективності системи в різних станах або при реалізації різних траєкторій у просторі станів, що проводиться аналітично, або методом моделювання, або експериментальним шляхом безпосередньо на об'єкті або його натурних моделях (макетах).

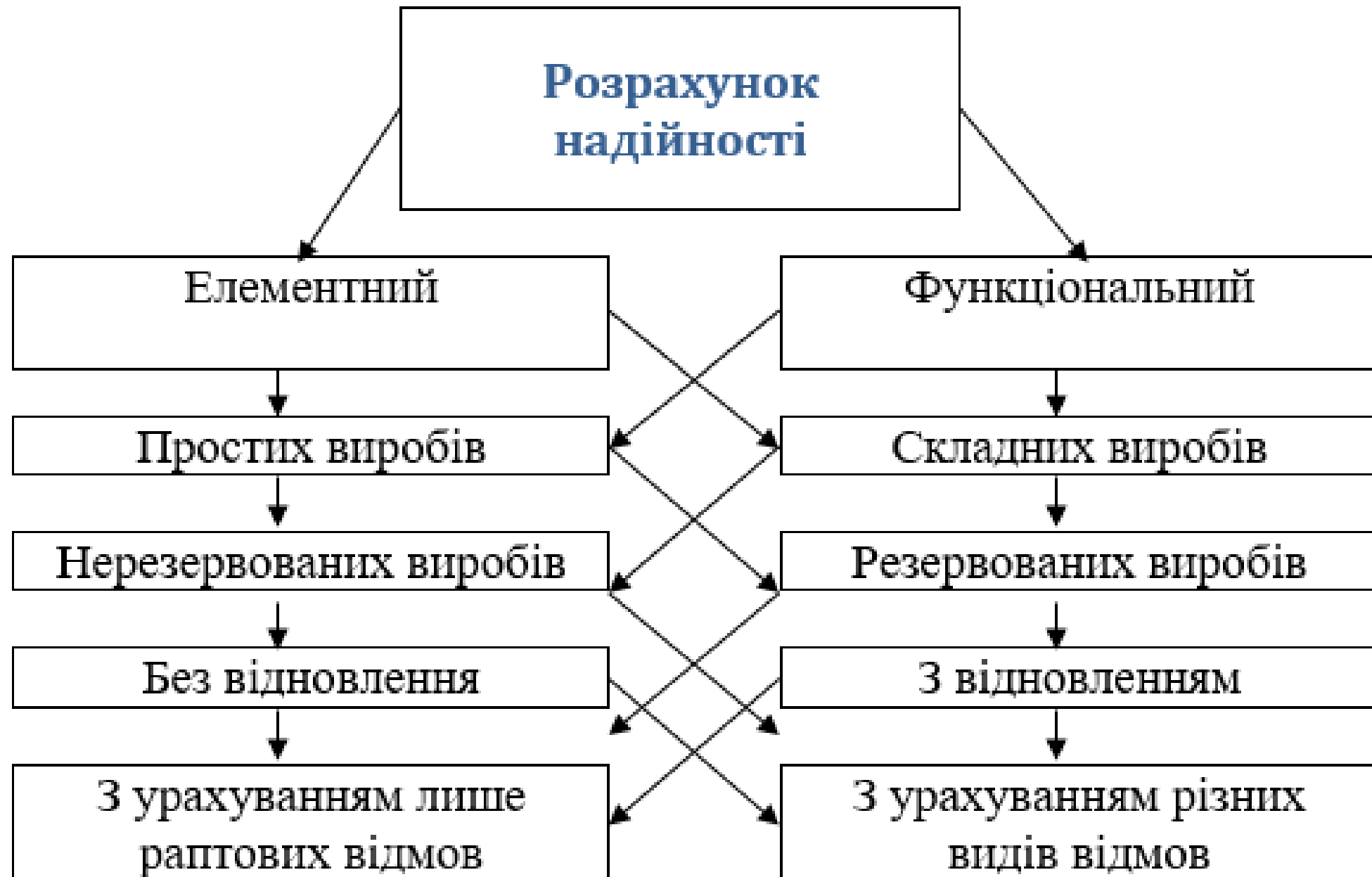
Фізичні методи застосовують для розрахунку безвідмовності, довговічності та збереження об'єктів, для яких відомі механізми їх деградації під впливом різних зовнішніх та внутрішніх факторів, що призводять до відмов (граничних станів) у процесі експлуатації (зберігання).

Методи засновані на описі відповідних процесів деградації за допомогою адекватних математичних моделей, що дозволяють обчислювати показники надійності з урахуванням конструкції, технології виготовлення, режимів та умов роботи об'єкта за довідковими або певними експериментально-фізичними або іншими властивостями речовин та матеріалів, що використовуються в об'єкті.

У загальному випадку зазначені моделі при одному провідному процесі деградації можуть бути представлені моделлю викидів деякого випадкового процесу за межі меж допустимої області його існування, причому межі цієї області можуть бути також випадковими і корельованими із зазначеним процесом (моделлю неперевиконання).

За наявності кількох незалежних процесів деградації, кожен з яких породжує свій розподіл ресурсу (напрацювання на відмову), результуючий розподіл ресурсу (напрацювання об'єкта вщент) знаходять з використанням моделі «Слабшої ланки» (розподіл мінімуму незалежних випадкових величин).

Компоненти моделей неперевищення можуть мати різну фізичну природу і відповідно описуватися різними видами розподілів випадкових величин (випадкових процесів), а також можуть бути в моделях накопичення пошкоджень. Цим зумовлено велике розмаїття моделей, що застосовуються на практиці, неперевищення, причому лише в відносно рідкісних випадках ці моделі допускають пряме аналітичне рішення. Тому основним методом розрахунку надійності за моделями неперевищення є *статистичне моделювання*.



Елементний розрахунок – визначення показників надійності об'єкта, обумовлених надійністю його комплектуючих частин (елементів). В результаті такого розрахунку оцінюється технічний стан об'єкта (ймовірність того, що об'єкт перебуватиме у працездатному стані, середнє напрацювання на відмову тощо).

Розрахунок функціональної надійності — визначення показників надійності виконання заданих функцій (наприклад, ймовірність того, що система очищення газу працюватиме заданий час у заданих режимах експлуатації зі збереженням усіх необхідних параметрів за показниками очищення). Оскільки такі показники залежать від низки факторів, що діють, то, як правило, розрахунок функціональної надійності більш складний, ніж елементний розрахунок.

Найпростіший розрахунок - елементний розрахунок апаратурної надійності простих виробів, нерезервованих, без урахування відновлення працездатності за умови, що час роботи повністю підпорядкований експоненційному розподілу.

Найскладніший розрахунок – розрахунок функціональної надійності складних резервованих систем з урахуванням відновлення їх працездатності та різних законів розподілу часу роботи та часу відновлення.

Вибір того чи іншого виду розрахунку надійності визначається завданням на розрахунок надійності. На підставі завдання та подальшого вивчення роботи пристрою (за його технічним описом) складається алгоритм розрахунку надійності, тобто послідовність етапів розрахунку та розрахункові формули.

4.2 АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ

Завдання розрахунку надійності технічних систем: визначення показників безвідмовності системи, що складається з елементів, що не відновлюються, за даними про надійність елементів і зв'язки між ними.

Мета розрахунку надійності:

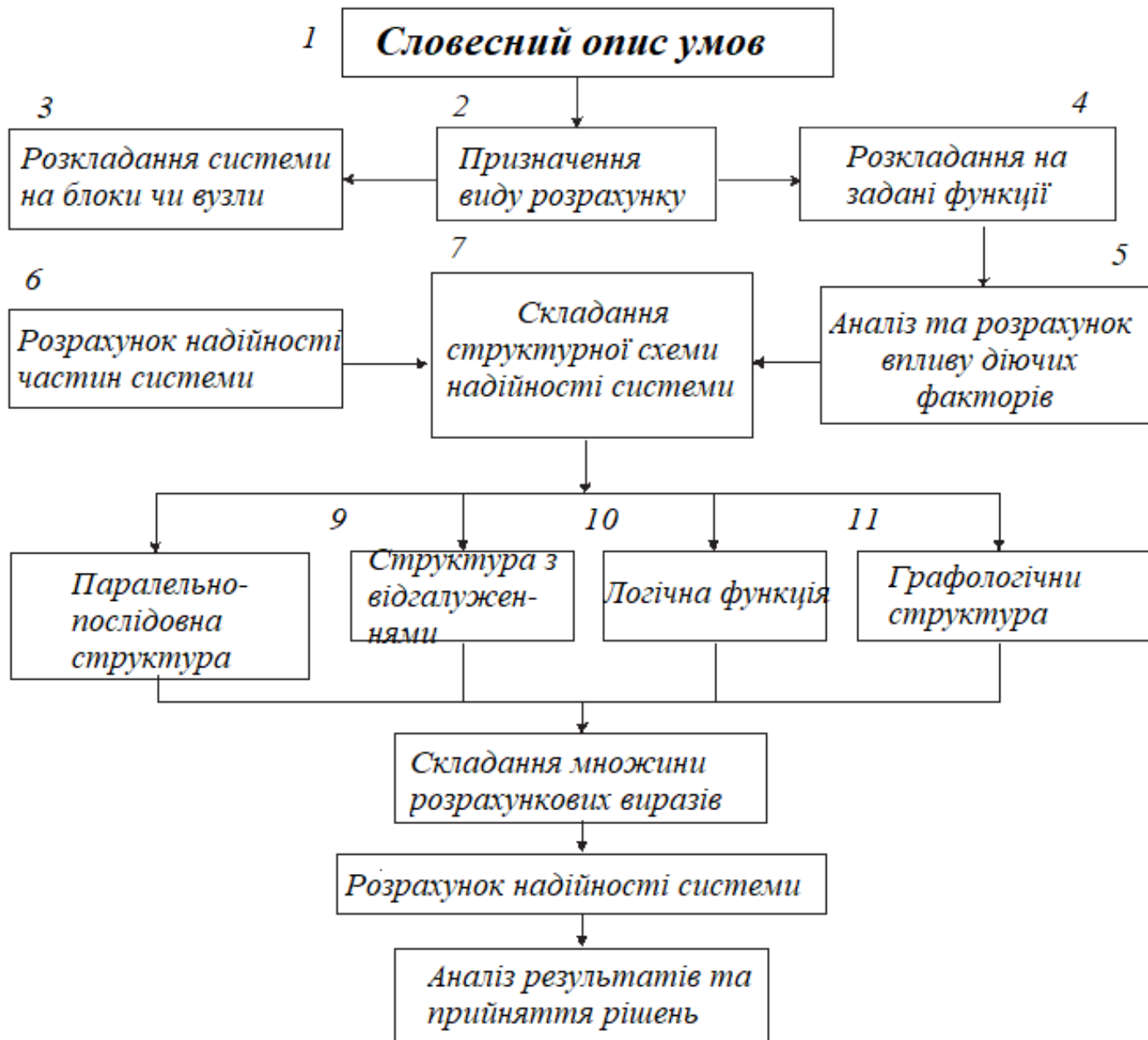
- обґрунтувати вибір того чи іншого конструктивного рішення;
- з'ясувати можливість та доцільність резервування;
- з'ясувати, чи потрібна надійність при існуючій технології розробки та виробництва.

Розрахунок надійності складається з наступних етапів:

1. Визначення складу показників надійності, що розраховуються.
2. Упорядкування (синтез) структурної логічної схеми надійності (структури системи), заснований на аналізі функціонування системи (які блоки включені, у яких полягає їх робота, перелік властивостей справної системи тощо.), і вибір методу розрахунку надійності.
3. Складання математичної моделі, що пов'язує показники системи, що розраховуються, з показниками надійності елементів.
4. Виконання розрахунку, аналіз одержаних результатів, коригування розрахункової моделі.

Фактично розрахунок надійності виробляється у кілька етапів:

1. На стадії складання технічного завдання на проєктовану систему, коли її структура не визначена, проводиться попередня оцінка надійності, виходячи з апріорної інформації про надійність близьких за характером систем та надійність комплектуючих елементів.
2. Складається структурна схема з показниками надійності елементів, заданими за нормальних (номінальних) умов експлуатації.
3. Остаточний (коефіцієнтний) розрахунок надійності проводиться на стадії завершення технічного проєкту, коли здійснено експлуатацію дослідних зразків та відомі всі можливі умови експлуатації. При цьому коригуються показники надійності елементів, часто у бік їх зменшення, вносяться зміни до структури – вибирається резервування.



Насамперед слід чітко сформулювати завдання на розрахунок надійності. У ньому мають бути зазначені:

- 1) призначення системи її складу та основні відомості про функціонування;
- 2) показники надійності та ознаки відмов, цільове призначення розрахунків;
- 3) умови, в яких працює (або працюватиме) система;
- 4) вимоги до точності та достовірності розрахунків, до повноти обліку чинних факторів.

З вивчення завдання робиться висновок про характер майбутніх розрахунків. У разі розрахунку функціональної надійності здійснюється перехід до етапів 4-5-7, у разі розрахунку елементів (апаратурної надійності) – до етапів 3-6-7.

Тема №5. Основні етапи та види розрахунків показників надійності електронних пристроїв та систем

ПЛАН

- 5.1 Види розрахунку надійності елементів і систем*
- 5.2 Основні етапи розрахунку надійності елементів і систем*
- 5.3 Методи оцінки надійності РЕУ при появі раптових відмов*
- 5.4 Наближений розрахунок надійності електронних пристроїв*
- 5.5 Уточнений розрахунок надійності електронних пристроїв*

5.1 ВИДИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ

Завдання розрахунку показників надійності електронних пристроїв: ***за наявними відомостями про надійність комплектуючих виробів і зв'язках між ними, необхідно визначити показники надійності електронного пристрою в цілому***

Розрахунок показників надійності електронного пристрою проводиться з метою:

- визначити, чи досяжні задані показники надійності розроблюваного пристрою;
- зробити вибір між різними конструктивними рішеннями;
- виявити найбільш ненадійні блоки;
- обґрунтувати необхідність і ефективність різних способів підвищення надійності.

Види розрахунку надійності

Приблизний розрахунок

швидка орієнтовна оцінка показників надійності електронного пристрою на самій ранній стадії проектування, коли відомо лише число комплектуючих елементів в схемі

Наближений розрахунок

якщо відома номенклатура комплектуючих виробів, що входять до складу розроблюваного електронного пристрою, але не відомі режими і умови їх роботи

Уточнений розрахунок

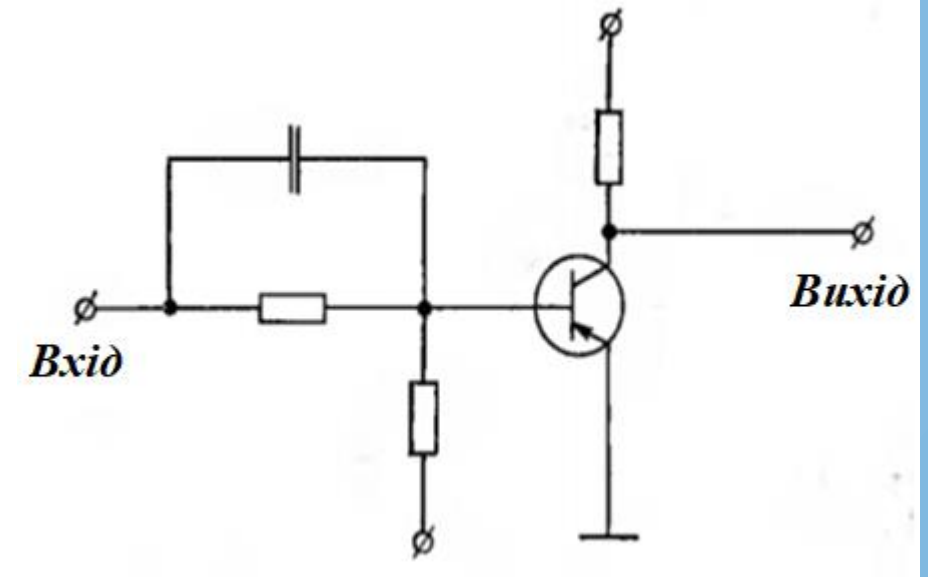
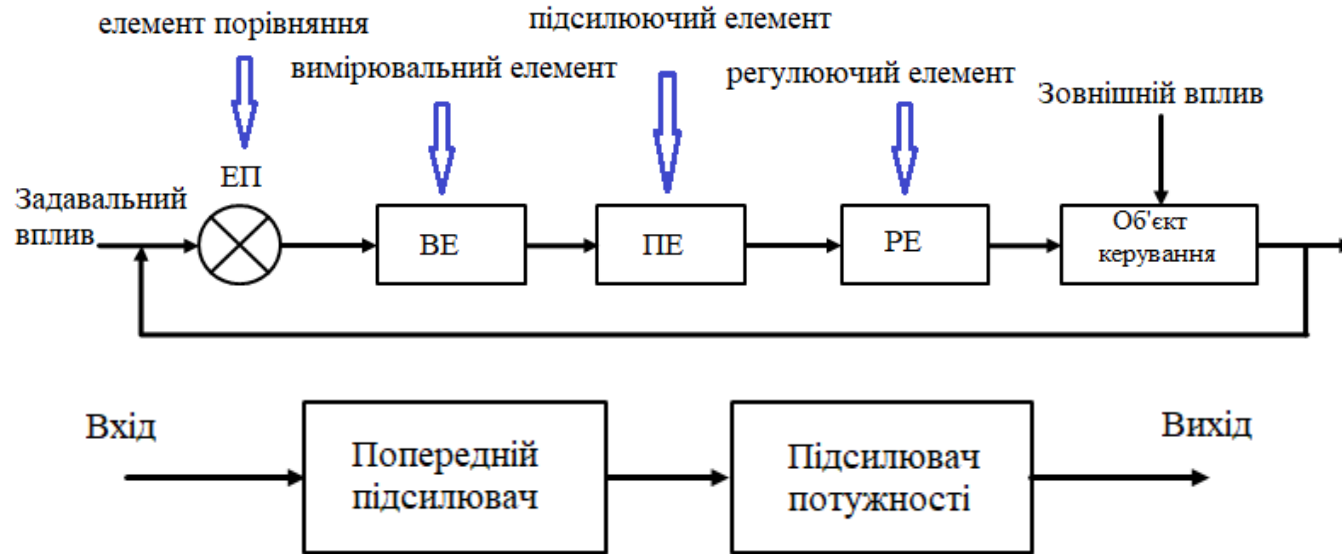
передбачає врахування режимів і умов застосування комплектуючих виробів і проводиться після повного завершення розробки принципової схеми, конструкції і визначення теплових і навантажувальних режимів електронного пристрою

При розрахунку надійності електронних пристроїв зазвичай приймають *допущення*:

- потоки відмов комплектуючих виробів в електронному пристрої є незалежними і найпростішими, а час безвідмовної роботи розподілено за експоненціальним законом;
- вплив відмови кожного комплектуючого виробу на працездатність електронного пристрою визначено однозначно;
- відмова виробу або тягне за собою відмову пристрою, або ні;
- проміжні стану не розглядаються;
- величина інтенсивності відмов однотипних комплектуючих виробів однакова;
- комплектуючі вироби працюють в основний період експлуатації, коли інтенсивність відмов постійна.

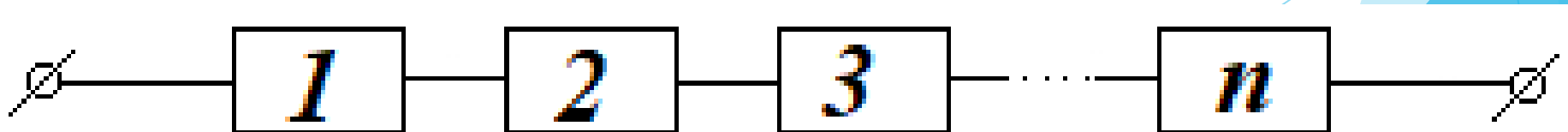
5.2 ОСНОВНІ ЕТАПИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ

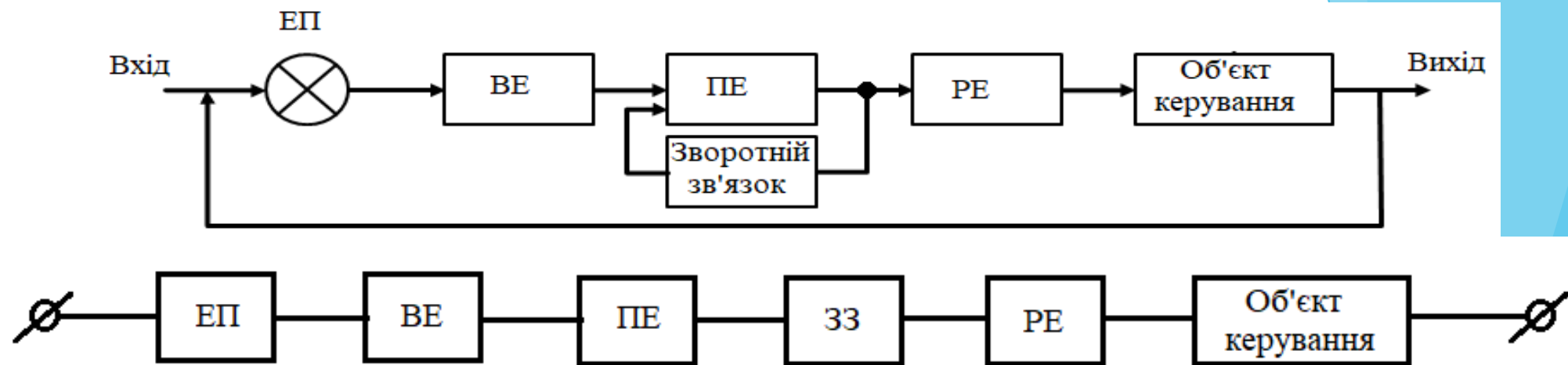
На *першому етапі* має бути здійснено поділ системи на окремі елементи.



На *другому етапі* формується поняття відмови для окремих елементів і системи в цілому.

На *третьому етапі* складається структурна схема розрахунку надійності.





На *четвертому етапі* здійснюють визначення характеристик безвідмовності всіх груп елементів з основним з'єднанням. характеристики визначають роздільно за раптовими і поступовим відмов.

На *п'ятому етапі* визначають характеристики відновлення всіх груп елементів, для яких передбачено відновлення.

На *шостому етапі* визначають характеристики надійності відновлюваних елементів з урахуванням характеристик безвідмовності і відновлення.

На *сьомому етапі* визначають характеристики надійності з урахуванням резервування і з урахуванням тимчасової надмірності.

5.3 МЕТОДИ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ РЕУ ПРИ ПОЯВІ РАПТОВИХ ВІДМОВ

Система з m елементів, що мають основне з'єднання.

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^m P_i(t)$$

Для кожного елемента:

$$P_i(t) = \prod_{j=1}^{m_i} P_j(t)$$

$P_j(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи
 j первинного елемента i елемента;
 m_i - кількість первинних елементів в i -
му елементі

Експонентний закон надійності
для первинних елементів:

$$P_c(t) = \prod_{k=1}^N e^{-\lambda_k t} = \exp \left(-t \sum_{k=1}^N \lambda_k \right)$$
$$\lambda_i = \sum_{j=1}^N \lambda_k$$
$$t_{\text{срс}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \lambda_k}$$

РЕУ складаються з елементів, що працюють в різних умовах експлуатації

$$P_c = \exp\left[-t \sum_{k=1}^e N_k e_k\right]$$

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^e N_k \lambda_k$$

N_k – кількість елементів k групи

e – кількість елементів

Для високонадійних систем $\lambda t \ll 1$:

$$P_c \cong 1 - \lambda_c t$$
$$f_c(t) \cong \lambda_c (1 - \lambda_c t)$$

Інтенсивність відмов первинних елементів залежить від режиму їх роботи, а також від умов зовнішнього середовища.

Три методи обліку цих факторів:

Перший метод. Для визначення залежності інтенсивності відмов від режиму роботи введемо поняття коефіцієнта навантаження. Під коефіцієнтом навантаження K_H розуміється відношення робочого навантаження до її номінального значення. Рівність $K_H = 0$ може означати її відсутність, наприклад для вібраційного навантаження. В інших випадках вона відповідає її номінального значення, наприклад при тепловій навантаженні.

Загальний вигляд залежності $\lambda = f(K_H)$, при врахуванні відомих з досвіду властивостей функції $f(K_H)$:

При $K_H = 0, \lambda = \lambda_0$, то функція є **монотонно-зростаючою**;

При $K_H = 0$ перша похідна дорівнює $\lambda' = 0$ функція $\lambda' = f(K_H)$ є також **монотонно-зростаючою**.

Приріст функції.

У межах невеликих змін K_H , в першому наближенні можна прийняти, що функції f та f_1 лінійно залежать від величини ΔK_H і пропорційні значенням функції на початку інтервалу, тоді:

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= a\lambda\Delta K_H \\ \Delta\lambda' &= b\lambda'\Delta K_H\end{aligned}$$

a і b – коефіцієнти пропорційності.

При $\Delta K_H \rightarrow 0$ отримаємо $\frac{\Delta\lambda}{\Delta K_H} = \lambda' = a\lambda$ та $\frac{\Delta\lambda'}{\Delta K_H} = \lambda'' = b\lambda'$.

Якщо підставити λ' у вираз λ'' , тоді отримаємо $\lambda'' - c\lambda = 0$

c – коефіцієнт пропорційності.

Розв'язок рівняння має вигляд:

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{(hK_H)^2}{2!} + \dots \right) = \lambda_0 \operatorname{ch}(hK_H)$$

h – поправочний коефіцієнт навантаження

В якості коефіцієнта навантаження приймають: при електричній навантаженні відношення робочого значення параметра до номінального за технічними умовами, наприклад розсіює потужність для транзисторів ІМС і резисторів, напруги для конденсаторів, прямий струм для ПП-діодів.

При **тепловому навантаженні** відношення абсолютної різниці температур до її номінального значення:

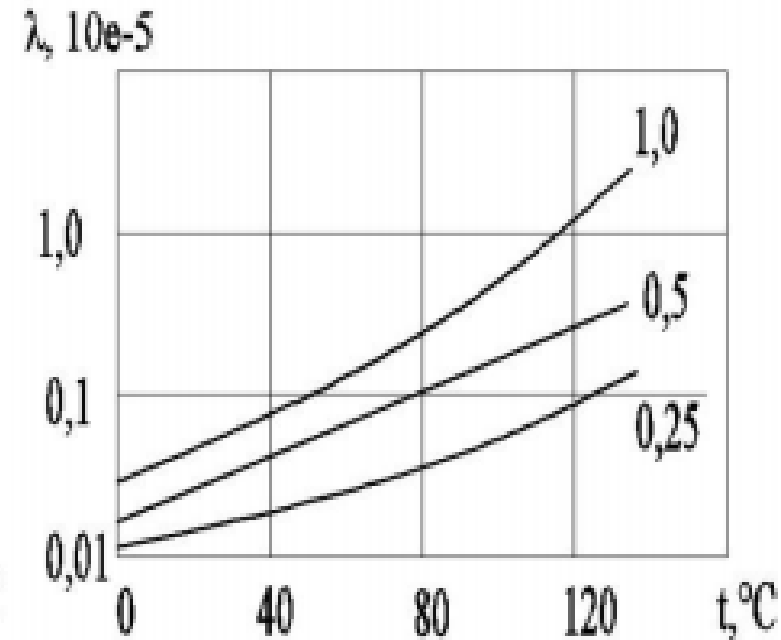
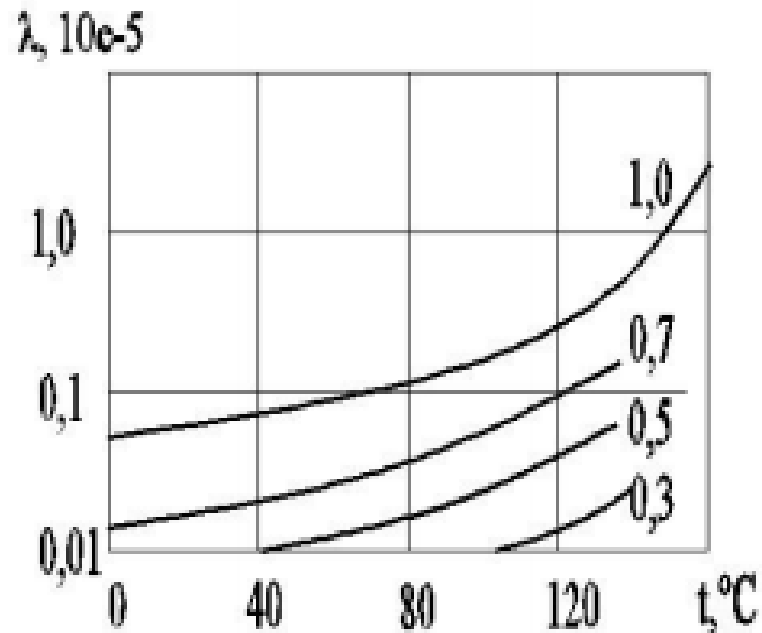
$$\frac{|T_{\text{роб}} - T_{\text{ном}}|}{T_{\text{ном}}} \quad T_{\text{ном}} = 25^{\circ}\text{C}$$

При **вібраційному навантаженні** відношення діючого прискорення до прискорення вільного падіння:

$$\frac{a_{\text{дійсн}}}{g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}$$

Другим методом обліку зовнішнього навантаження (виключаючи електричну) є метод поправочних коефіцієнтів, при цьому інтенсивність відмов первинних елементів множиться на коефіцієнт, що відповідає різним умовам експлуатації.

Третій спосіб. Метод розрахункових або експериментальних графіків, характеризують залежність інтенсивності відмов від температури або електричного навантаження. Представимо деякі графіки, отримані в результаті випробувань.



Для ряду радіоелектронних пристроїв або елементів існує циклічний режим роботи. Досвід експлуатації показує, що при високій частоті включення відбувається збільшення інтенсивності відмов, викликане відмовами, які відбулися в апаратурі, яка перебуває у вимкненому стані або через збільшення електричного навантаження в момент включення або внаслідок нестационарних теплових процесів, після включення або виключення. Інтенсивність відмов будь-якого пристрою можна уявити як

$$\lambda = \lambda_{\text{роб}} + \lambda_{\text{ц}} n$$

$$\lambda t = \lambda_{\text{роб}} t + \lambda_{\text{ц}} n t = \lambda_{\text{роб}} \left(t + \varphi t \left(\frac{N^*}{t} \right) \right)$$

$$\lambda t = \lambda_p (t + \varphi N^*)$$

Якщо виявиться що на інтервалі часу t , частина цього часу система перебувала в стані зберігання (або у вимкненому стані):

$$t_{xp} = t - t_p$$

$$\lambda_{xp} < \lambda_p$$

Тривалості ділянки роботи і зберігання

$$t_p = t_{p1} + \dots + t_{pn}$$

$$t_{xp} = t_{xp1} + \dots + t_{xpn}$$

Зберігання і цикли включення апаратури, ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c(t) = \exp[-(\lambda_p t_p + \lambda_{xp} t_{xp} + \lambda_y n t)] = \exp\left[-\lambda_p t_p \left(1 + \alpha z + \frac{\varphi N^*}{t_p}\right)\right]$$

$$\alpha = \frac{\lambda_{xp}}{\lambda_p} \quad z = \frac{t_{xp}}{t_p} \quad \varphi = \frac{\lambda_{\text{ц}}}{\lambda_p}$$

$$\lambda_{xp} = (0,001 \dots 0,1) \lambda_p$$

$$\varphi = 7 \dots 8 \text{ при } n=2$$

$$\varphi = 0,5 \dots 0,8 \text{ при } n=5$$

$$\varphi = \frac{\lambda_{\varphi}}{\lambda_p} = 0,5 \quad \lambda_{\text{ц}} = 0,5 \lambda_p$$

$$\lambda_{\text{ц}} n = 0,5 \lambda_p 5 = 2,5 \lambda_p$$

5.4 НАБЛИЖЕНИЙ РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Для наближеного розрахунку надійності електронного пристрою необхідно мати такі дані: номенклатура та кількість комплектуючих виробів одного виду, що входять до складу розроблюваного устрою, а також статистичні дані про їх інтенсивності відмов. Наближений розрахунок виконується в наступному порядку:

1. Формулюється критерій відмови електронного пристрою.
2. Визначаються кількість комплектуючих виробів одного виду, що входять до складу проєктованого електронного пристрою, і інтенсивність їх відмов.
3. На основі визначених вище даних, складається таблиця для проведення наближеного розрахунку надійності пристрою

1	Найменування та тип комплектуючого виробу (елементу)
2	Кількість комплектуючих виробів (елементів) N_i
3	Табличне значення інтенсивності (параметру потоку) відмов комплектуючого виробу (елементу) $\lambda_{0i} \cdot 10^{-6}, 1/\text{год}$
4	$N_i \cdot \lambda_{0i} \cdot 10^{-6}, 1/\text{год}$
5	Коефіцієнт відмов $K_0, \%$

Розрахункова інтенсивність відмов:

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^N \lambda_{oi}$$

Коефіцієнт відмов:

$$K_o = \frac{N_i \lambda_{pi}}{\sum_{i=1}^k N_i \lambda_{pi}}.$$

Показники безвідмовності:

середнє напрацювання на відмову

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_p}$$

ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$ за заданий час t

$$p(t) = e^{-\lambda t}$$

5.5 УТОЧНЕНИЙ РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Для уточненого розрахунку надійності електронних пристроїв необхідно мати принципову і монтажну схему пристрою, специфікацію елементів і статистичні дані про їх інтенсивності відмов, що наводяться в довідковій літературі або нормативно-технічної документації. Крім цього, необхідні відомості про електричних і теплових режимах роботи проектованого пристрою і режимах його експлуатації.

Уточнений розрахунок надійності електронних пристроїв ***виконують в наступній послідовності:***

1. Пристрій розбивається на окремі функціонально самостійні блоки.
2. Формулюється критерій відмов функціональних блоків і пристрою в цілому.

3. Складається структурно-логічна схема (СЛС) надійності електронного пристрою.
4. Складається розрахункова таблиця

Найменування та тип комплектуючого виробу (елементу)	Кількість комплектуючих виробів (елементів) N_i	Табличне значення інтенсивності (параметру потоку) відмов комплектуючого виробу (елементу) $\lambda_{0i} \cdot 10^{-6}, 1/\text{год}$	Значення параметрів		K_n	a_1	a_2	$\lambda_{pi} \cdot 10^{-6}, 1/\text{год}$	$N \cdot \lambda_i \cdot 10^{-6}, 1/\text{год}$	K_0	T_{Bi}	$K_0 \cdot T_{Bi}$
1	2	3	факт	номінальне	6	7	8	9	10	11	12	13

Інтенсивність відмов для різних умов і режимів використання комплектуючих виробів

$$\lambda_{pi} = \lambda_{0i} \prod_1^n a_i$$

У разі послідовного з'єднання елементів, сумарна робоча інтенсивність відмов всього електронного пристрою визначається за формулою:

$$\lambda_{p\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_{pi}$$

ймовірність безвідмовної роботи $p(t) = e^{-\lambda_{p\Sigma} t}$
 середнє напрацювання
 середнє число відмов за певну напрацювання t
 коефіцієнт готовності

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_{p\Sigma}}$$

$$K_r = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_v}$$

час простою за певну напрацювання $T_{пр} = m_{cp} \cdot T_v$

коефіцієнт оперативної готовності $K_{ог} = p(t) \cdot K_r$

коефіцієнт відмов $K_{0i} = \frac{\lambda_{pi}}{\lambda_{p\Sigma}} \cdot 100\%$

$$K_0 = \frac{N_i \lambda_{pi}}{\sum_{i=1}^k N_i \lambda_{pi}}$$

$$m_{cp} = \frac{t}{T_{cp}}$$

Розрахунок ремонтоздатності

У технічному завданні на електронні пристрої, прилади та системи повинні вказуватися не тільки показники безвідмовності (найчастіше середнє напрацювання на відмова), а й показники ремонтпридатності, так як тривалість простою в умовах експлуатації автоматизованої технологічної установки залежить не тільки від частоти відмов, а й тривалості їх усунення. Конструктор розробляє стратегію ремонту та технічного обслуговування, в якій передбачені технологія ремонтних робіт (ремонт шляхом заміни окремих елементів, агрегатно-вузловий метод ремонту і т.д.)

На основі стратегії ремонту визначаються елементи, що замінюються і ремонтуються на місці експлуатації (ЕР) технічних виробів. Як ЕР можуть бути окремі напівпровідникові елементи, плати, блоки, мікроскладення і т. п. Для кожного ЕР визначається середній час ремонту T_{Bi} , яке може бути визначено за довідковими даними, з досвіду експлуатації аналогів, в результаті проведення хронометражних спостережень за усуненням відмов.

Тема № 6. Структурно-логічний аналіз електронних систем

ПЛАН

6.1 Структурні моделі надійності

6.2 Методи структурно-логічного аналізу ЕС

6.3 Мосткові та комбіновані схеми та методи їх логічного аналізу

6.1 СТРУКТУРНІ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ

Способи складання графічних моделей надійності:

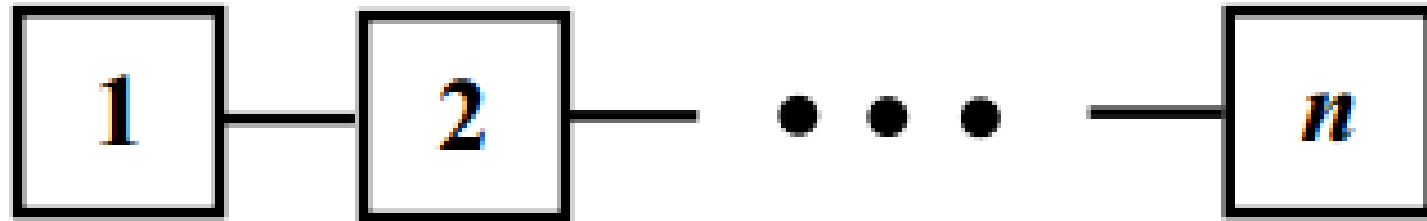
- 1) при дослідженні функціонування електронної системи виявляються можливі відмови її елементів і оцінюється їх вплив на працездатність;
- 2) система, що досліджується, розділяється таким чином, щоб окремі його частини були незалежні щодо відмов.

Універсальними моделями надійності є *послідовна, паралельна і змішана*.

Стан системи визначається за станом елементів і їх поєднанням. Тому теоретично можливо розрахунок безвідмовності будь ТС звести до перебору всіх можливих комбінацій станів елементів, визначення ймовірності кожного з них і додаванню ймовірностей працездатних станів системи.

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.



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

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

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

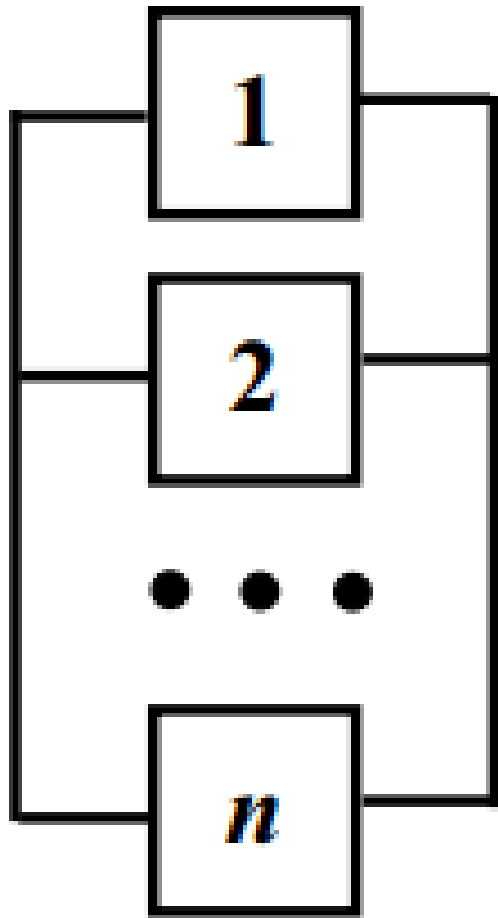
$$P = p_i^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n$$

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

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

Системи з паралельним з'єднанням елементів

Системою з паралельним з'єднанням елементів називається система, відмова якої відбувається тільки в разі відмови всіх її елементів.



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

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

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

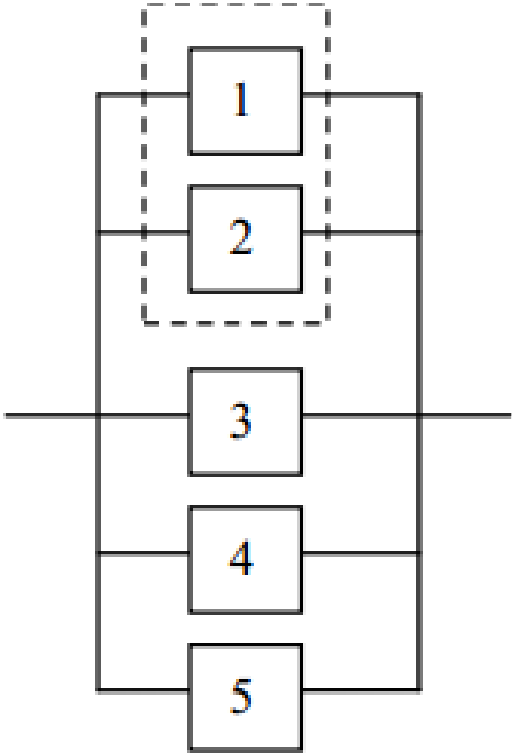
$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n$$

$$T_0 = T_{0i} \left(\ln n + \frac{1}{2n} + 0.577 \right)$$

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}$$

Системи типу "m из 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 m елементів (m < n).



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

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 дослідів, якщо в окремому досвіді ймовірність появи події становить p. При цьому ймовірність появи події рівно k раз визначається

$$P_k = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$$

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

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

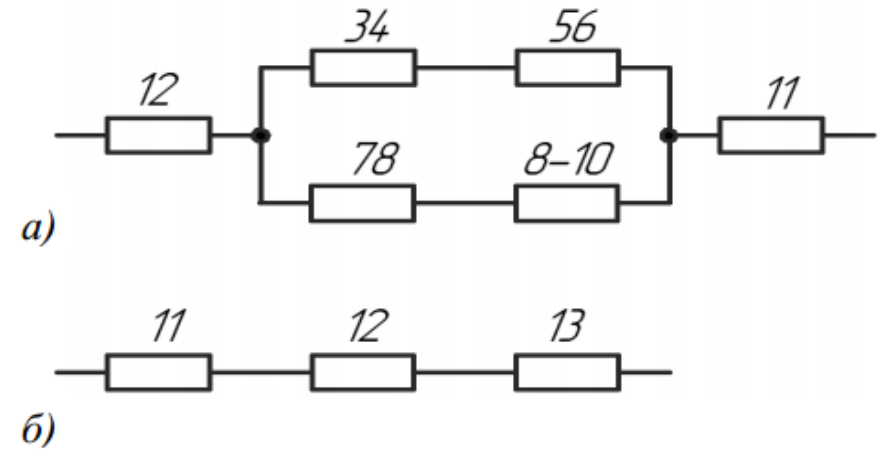
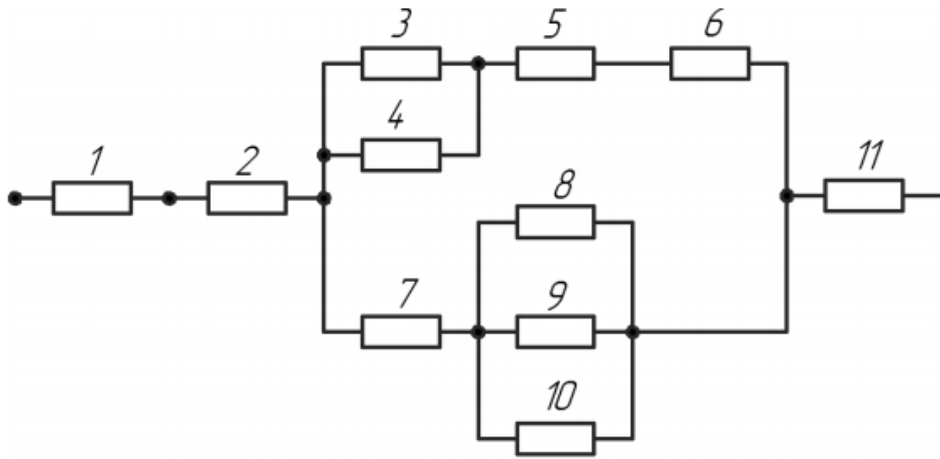
$$P = \sum_{k=m}^n P_k = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$$

m	Загальна кількість елементів, n				
	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

6.2 МЕТОДИ СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ЕС

Метод еквівалентування

Даний метод заснований на використанні залежностей для відшукування ймовірності безвідмовної роботи P_c і відмови Q_c системи.



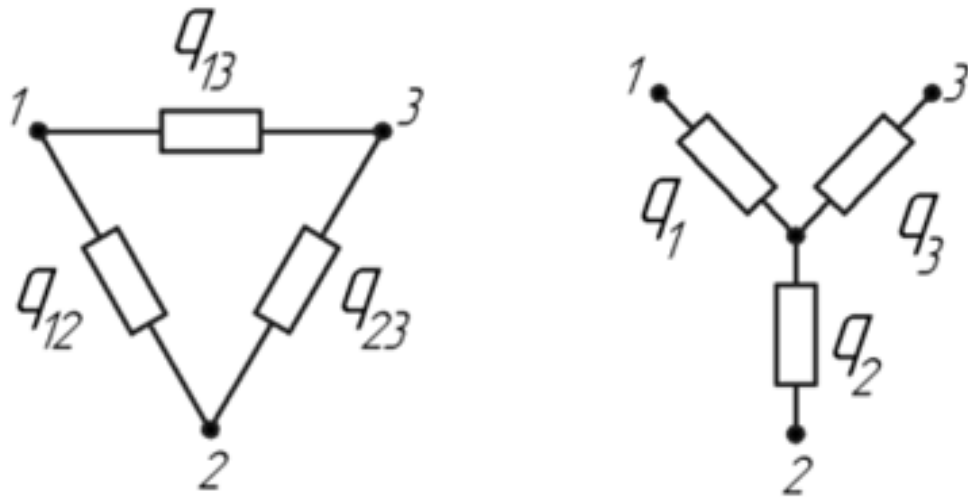
$$R_{12} = R_1 P_2; \quad P_{34} = 1 - q_3 q_4 = 1 - (1 - P_3)(1 - P_4)$$

$$P_{56} = P_5 P_6; \quad R_{8-10} = 1 - q_8 q_9 q_{10} = 1 - (1 - P_8)(1 - P_9)(1 - P_{10}).$$

$$P' = P_{34} P_{56}; \quad P'' = P_7 P_{8-10}; \quad R_{13} = 1 - (1 - P')(1 - P''). \quad P_c = R_{11} R_{12} R_{13}$$

Метод взаємної заміни «трикутника» та «зірки».

Заміна «трикутника» на «зірку». Припустимо, що необхідно замінити з'єднання елементів у «трикутник» на з'єднання «зіркою».



$$P' = 1 - q' = R_{12}R_{23} = (1 - q_{12})(1 - q_{23});$$
$$q' = 1 - P' = 1 - (1 - q_{12})(1 - q_{23}).$$

$$q_{13}^{\Delta} = q_{13} \cdot q' = q_{13}[1 - (1 - q_{12})(1 - q_{23})] = q_{13}(q_{12} + q_{23} - q_{12}q_{23})$$

$$q_{12}^{\Delta} = q_{12}(q_{13} + q_{23} - q_{13}q_{23});$$

$$q_{23}^{\Delta} = q_{23}(q_{12} + q_{13} - q_{12}q_{13}).$$

$$q_{13}^Y = 1 - (1 - q_1)(1 - q_3) = q_1 + q_3 - q_1q_3$$

$$q_{12}^Y = q_1 + q_2 - q_1q_2;$$

$$q_{23}^Y = q_2 + q_3 - q_2q_3.$$

$$\begin{cases} q_{13}^\Delta = q_{13}^Y; \\ q_{12}^\Delta = q_{12}^Y; \\ q_{23}^\Delta = q_{23}^Y. \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_{13}q_{12} + q_{13}q_{23} - q_{12}q_{13}q_{23} = q_1 + q_3 - q_1q_3; \\ q_{13}q_{12} + q_{12}q_{23} - q_{12}q_{13}q_{23} = q_1 + q_2 - q_1q_2; \\ q_{23}q_{12} + q_{13}q_{23} - q_{12}q_{13}q_{23} = q_2 + q_3 - q_2q_3. \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_{13}q_{12} + q_{13}q_{23} = q_1 + q_3; \\ q_{13}q_{12} + q_{12}q_{23} = q_1 + q_2; \\ q_{23}q_{12} + q_{13}q_{23} = q_2 + q_3. \end{cases}$$

	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>
$\left\{ \begin{array}{l} q_{13}q_{12} + q_{13}q_{23} = q_1 + q_3 \\ q_{13}q_{12} + q_{12}q_{23} = q_1 + q_2 \\ q_{23}q_{12} + q_{13}q_{23} = q_2 + q_3 \end{array} \right.$	+	-	-
	-	+	-
	-	-	+

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1 = q_{12}q_{13}; \\ q_2 = q_{12}q_{23}; \\ q_3 = q_{13}q_{23}. \end{array} \right.$$

Заміна «зірки» на «трикутник». При необхідності перетворити з'єднання елементів «зіркою» на з'єднання в «трикутник» має бути виконано множення і поділ рівнянь системи

	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>
$q_1 = q_{12}q_{13}$	$\times$	$\times$	$\div$
$q_2 = q_{12}q_{23}$	$\times$	$\div$	$\times$
$q_3 = q_{13}q_{23}$	$\div$	$\times$	$\times$

$$\frac{q_1 q_2}{q_3} = \frac{q_{12} q_{13} q_{12} q_{23}}{q_{13} q_{23}} = q_{12}^2$$

$$q_{12} = \sqrt{\frac{q_1 q_2}{q_3}}$$

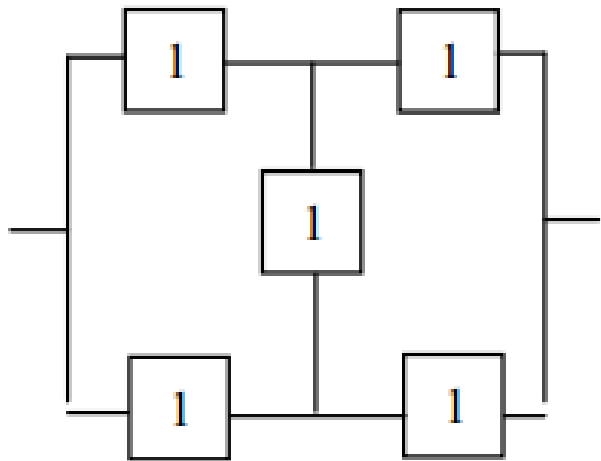
$$q_{13} = \sqrt{\frac{q_1 q_3}{q_2}};$$

$$q_{23} = \sqrt{\frac{q_2 q_3}{q_1}}.$$

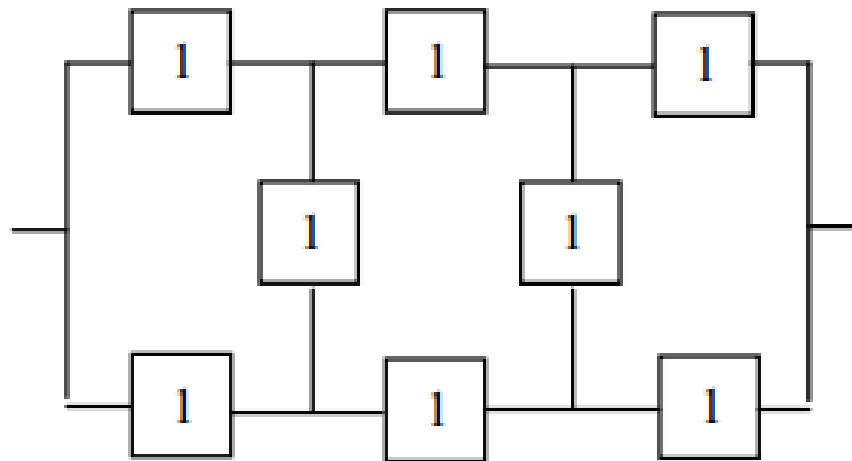
6.3 МОСТКОВІ ТА КОМБІНОВАНІ СХЕМИ ТА МЕТОДИ ЇХ ЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ

Мосткова структура не зводиться до паралельного або послідовному типу з'єднання елементів, а являє собою паралельне з'єднання послідовних ланцюжків елементів з діагональними елементами, включеними між вузлами різних паралельних гілок.

Працездатність такої системи визначається не тільки кількістю відмовили елементів, але і їх положення в структурній схемі.



а)



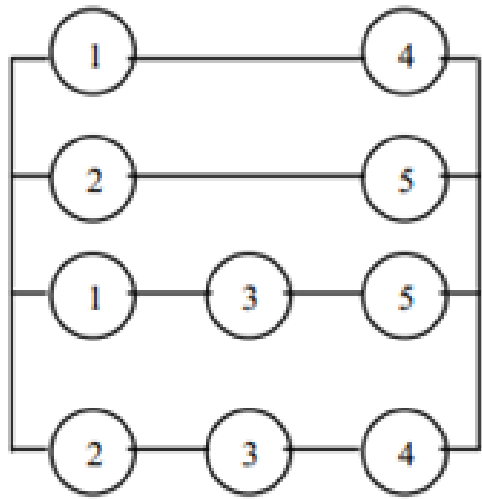
б)

№ стану	Стан елементів					Стан системи	Ймовірність стану	
	1	2	3	4	5		в загальному випадку	при рівнонадійних елементах
1	+	+	+	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	$p^4 q^1 = p^4 (1 - p)$
3	+	+	+	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
4	+	+	-	+	+	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
5	+	-	+	+	+	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
6	-	+	+	+	+	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
7	+	+	+	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	$p^3 q^2 = p^3 (1 - p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
9	+	-	+	+	-	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
10	-	+	+	+	-	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	
11	+	+	-	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
12	+	-	+	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
13	-	+	+	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
14	+	-	-	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
15	-	+	-	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
16	-	-	+	+	+	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
17	+	+	-	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	$p^2 q^3 = p^2 (1 - p)^3$
18	+	-	+	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
19	-	+	+	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
20	+	-	-	-	+	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
21	-	+	-	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
22	-	-	-	+	+	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
23	+	-	-	+	-	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
24	-	+	-	+	-	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
25	-	-	+	-	+	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
26	-	-	+	+	-	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
27	+	-	-	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	$p^1 q^4 = p^1 (1 - p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
29	-	-	+	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
30	-	-	-	+	-	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
31	-	-	-	-	+	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
32	-	-	-	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	$q^5 = (1 - p)^5$

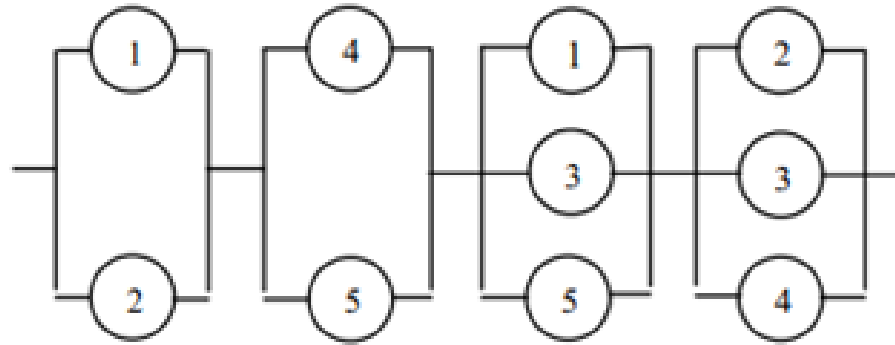
$$P = p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 + q_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 q_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 p_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5.$$

$$P = p^5 + 5p^4 q + 8p^3 q^2 + 2p^2 q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

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



*Логічна схема мостикової
схеми за методом
мінімальних шляхів*



*Логічна схема мостикової
схеми за методом
мінімальних перетинів*

Метод мінімальних шляхів для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи

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

Функція алгебри логіки

$$A = 1 - (1 - a_1 a_4)(1 - a_2 a_5)(1 - a_1 a_3 a_5)(1 - a_2 a_3 a_4)$$

$$A = a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_4 - \\ - a_1 a_2 a_3 a_5 - 2a_1 a_2 a_4 a_5 - a_2 a_3 a_4 a_5 + 2a_1 a_2 a_3 a_5$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4 - \\ - p_1 p_2 p_3 p_5 - 2p_1 p_2 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$$

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

Мінімальним перетином називається набір непрацездатних елементів, відмова яких призводить до відмови системи, а відновлення працездатності будь-якого з них – до відновлення працездатності системи.

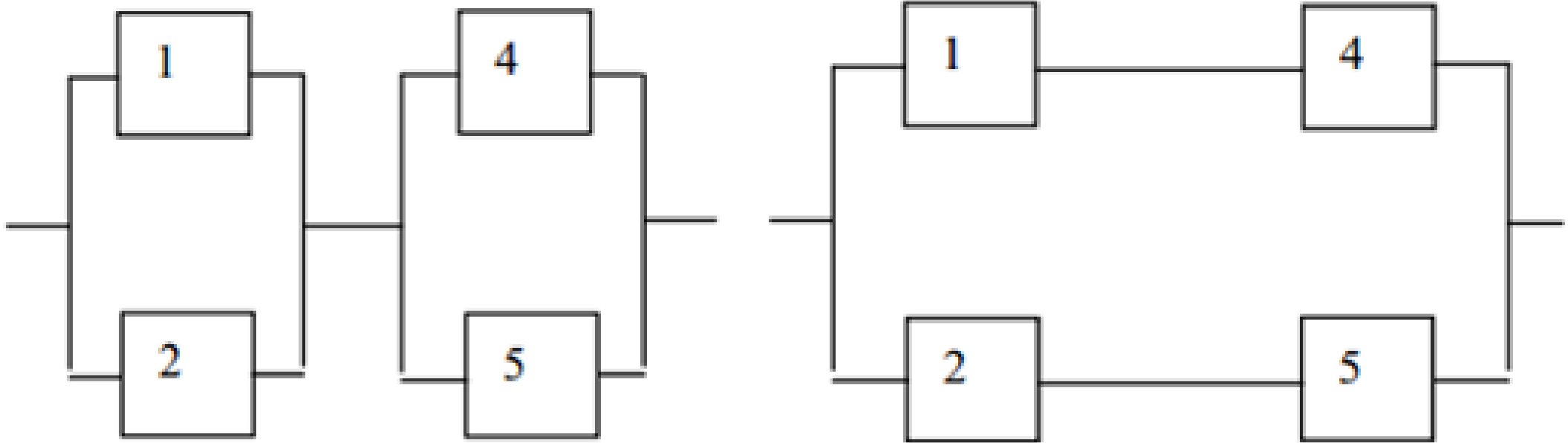
Функція алгебри логіки

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

Метод розкладання щодо особливого елемента

У ряді випадків аналізу надійності ТЗ вдається скористатися методом розкладання щодо особливого елемента, заснованими на відомій в математичній логіці теоремі про розкладанні функції логіки з будь-якого аргументу.

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0)$$



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

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5).$$

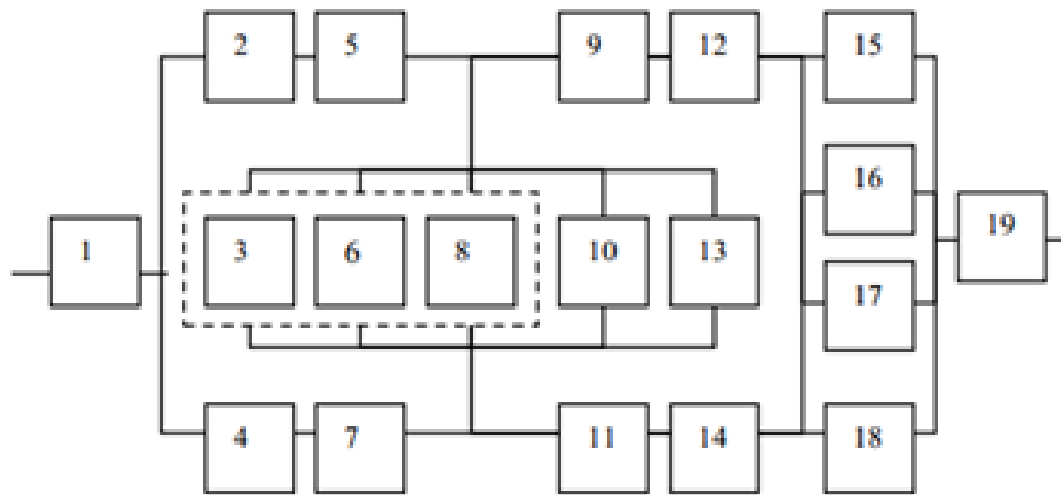
$$P = p_3 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)] + (1 - p_3) [1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)]$$

$$P = p_i p_j P(p_i = 1, p_j = 1) + p_i q_j P(p_i = 1, p_j = 0) + q_i p_j P(p_i = 0, p_j = 1) + q_i q_j P(p_i = 0, p_j = 0).$$

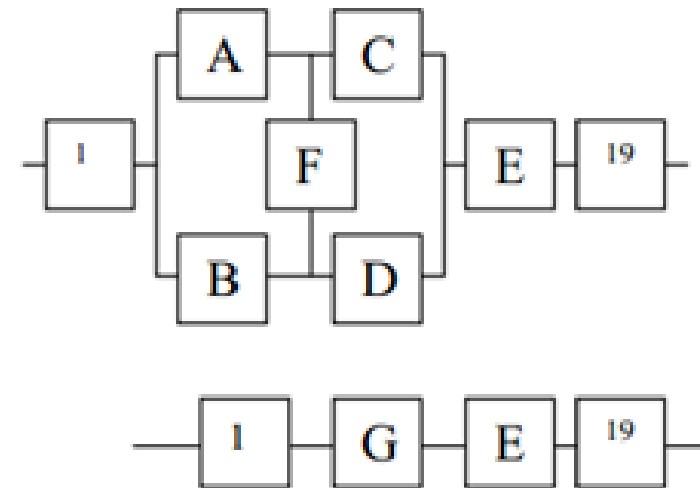
$$P = p_3 p_6 P(p_3 = 1, p_6 = 1) + p_3 q_6 P(p_3 = 1, p_6 = 0) + q_3 p_6 P(p_3 = 0, p_6 = 1) + q_3 q_6 P(p_3 = 0, p_6 = 0).$$

Комбіновані системи

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



Вихідна система



Системи, що перетворені

Тема № 7. Підвищення надійності електронних систем

ПЛАН

- 7.1 Заходи, що використовуються для підвищення надійності технічних засобів*
- 7.2 Основні поняття, означення і класифікація методів резервуваних*
- 7.3 Загальне резервування з постійно включеним резервом і цілою кратністю*
- 7.4 Роздільне резервування з постійно включеним резервом і цілою кратністю*
- 7.5 Загальне і роздільне резервування заміщенням з цілою кратністю*
- 7.6 Резервування з дробовою кратністю*
- 7.7 Розрахунок надійності ТЗ з інформаційною надлишковістю*
- 7.8 Розрахунок надійності ТЗ із тимчасовим резервуванням*

7.1 ЗАХОДИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ



Системні заходи

- Внесення у вартість ТЗ витрат на гарантійні ремонт і обслуговування. При цьому розробник враховує, що при підвищенні надійності зменшуються витрати на гарантійний ремонт і обслуговування, тобто прибуток стає найбільшим при певному значенні показника надійності, який перевищує максимально допустимий рівень. У цьому випадку розробники та виготовлювачі ТЗ прагнуть визначити цей рівень і досягти його.
- Планування витрат на весь термін служби проектового ТЗ.
- Технічні заходи щодо оформлення показників надійності проєктованих ТЗ необхідні при будь-якій системі взаємин замовника і розробника. До технічних заходів відносять врахування зовнішніх впливів на проєктовані технічні засоби:
 - а) робочі (важкий ударно-вібраційний режим, температурний режим, агресивне хімічне середовище, ядерна реакція);
 - б) кліматичні (температура, вологість, домішки в повітрі);
 - в) біологічні (грибок або цвіль, комахи, гризуни)

Структурні (схемні) заходи

варіанти будови ТЗ, нечутливих до появи відмов, за рахунок введення надлишкових апаратурних і програмних засобів.

При цьому можуть використовуватися і апаратні (наприклад, резервування), і програмні (наприклад, порівняння результатів надлишкових обчислень) засоби.

У ряді випадків також можуть застосовуватися й апаратно-програмні засоби виявлення відмов елементів і відновлення ТЗ.

Конструктивні заходи

Час усунення відмови можна істотно зменшити шляхом побудови ТЗ за блочно-вузловим способом. При цьому всі ТЗ розбиваються на окремі функціонально закінчені блоки, що в електронних системах з'єднуються між собою кабелями, а в механічних – зв'язуються кінематично. Блоки у свою чергу розбиваються на функціонально закінчені вузли, виконувані у вигляді легкознімних конструкцій. При такій будові ТЗ відновлення полягає в заміні несправних блоків або вузлів, що значно прискорює процес введення ТЗ у роботу. Здійснення блочновузлових конструкцій тісно пов'язано з уніфікацією елементів і систем, що виконується на основі відбору найбільш надійних варіантів. При цьому не лише підвищується надійність ТЗ, а й знижується їх вартість, спрощується виготовлення. У ряді випадків вдається створити дуже складні ТЗ з елементів двох-трьох типів.

Експлуатаційні заходи формуються на стадії проектування ТЗ полягає в розробці системи експлуатаційного забезпечення. Проектування ТЗ при цьому повинно здійснюватися відповідно до номенклатури робіт з технічного обслуговування.

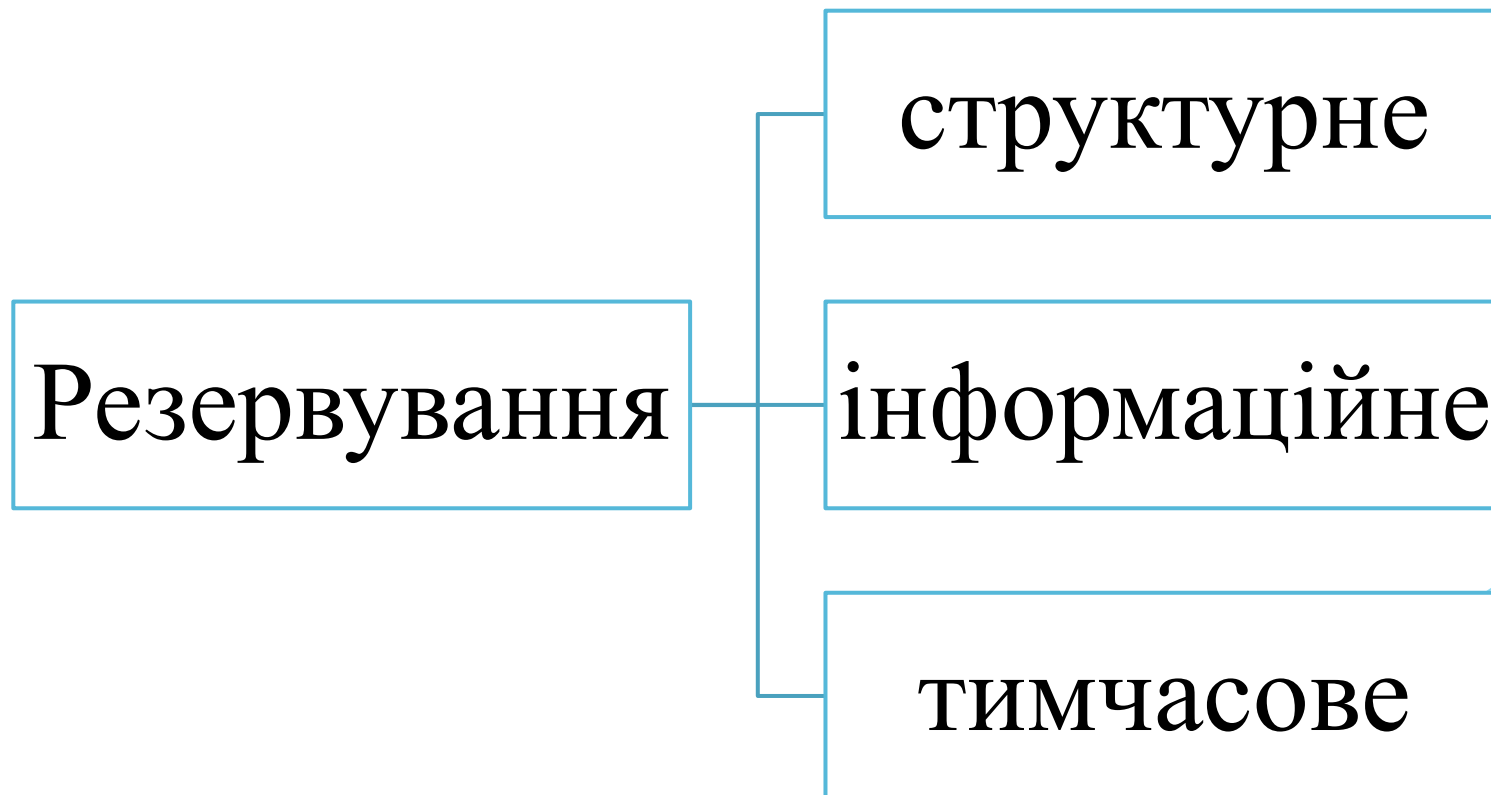
Наприклад, для планування періодичного регулювання параметрів ТЗ необхідно передбачити можливість контролю і прогнозування значень цих параметрів.

Шляхи підвищення надійності технічних засобів:

- використання високонадійних елементів;
- забезпечення оптимальних режимів роботи елементів і електричних режимів;
- резервування;
- використання самонастроюваних і самоорганізовувальних систем;
- відновлення несправних ТЗ;
- діагностування технічних засобів;
- якість виготовлення ТЗ;
- якість експлуатації ТЗ

7.2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ОЗНАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ РЕЗЕРВОВАНИХ ТЗ

Резервуванням називають метод підвищення надійності ТЗ за рахунок введення надлишку. Під **надлишком** розуміють додаткові засоби і можливості окрім мінімально необхідних для виконання ТЗ заданих функцій.



Структурне резервування (або апаратне) передбачає використання надлишкових елементів ТЗ.

Суть такого виду резервування полягає в тому, що в мінімально необхідний варіант ТЗ, елементи якого називають основними, вводяться додаткові елементи, вузли, пристрої або навіть замість одного ТЗ передбачається використання декількох ідентичних ТЗ. При цьому надлишкові резервні структурні елементи, вузли, пристрої тощо призначені для виконання робочих функцій при відмові відповідних основних елементів, вузлів і пристроїв.

Інформаційне резервування передбачає використання надлишкової інформації.

Найпростішим прикладом реалізації такого виду резервування є багаторазова передача одного й того ж повідомлення каналом зв'язку. Як інший приклад можна навести використання спеціальних кодів, що виявляли помилки, (коди з повторенням і інверсією, циклічний код, код Хеммінга і т. ін.), які з'являються в результаті збоїв і відмов апаратури. Тут варто відмітити, що використання інформаційного резервування спричиняє також необхідність введення надлишкових елементів

Тимчасове резервування передбачає використання надлишкового (резервного) часу для відновлення технічних характеристик.

У випадку застосування цього виду резервування передбачається можливість поновлення функціонування ТЗ після того, як воно було перервано в результаті відмови, шляхом його відновлення. При цьому також передбачається, що на виконання ТЗ необхідної роботи приділяється час, свідомо більший мінімально необхідного.

Резервування може бути ***загальним*** (застосування до ТЗ в цілому) та ***роздільне*** (застосування до окремих елементів ТЗ або групи елементів)

ТЗ із використанням *структурного виду резервування* можуть класифікуватися за різними ознаками, основними з яких є:

- реакція ТЗ на появу відмови;
- режим роботи резервних елементів;
- вигляд схеми резервування;
- спосіб включення резервних елементів;
- ступінь надмірності тощо.

У першу чергу різні резервовані ТЗ відрізняються один від одного реакцією на появу відмов, тобто своїми *«динамічними властивостями»*. З цього погляду розрізняють два методи резервування: *активне* і *пасивне*.

При *активному резервуванні* структура ТЗ така, що з появою відмови вона перебудовується і відбувається відновлення працездатності, тобто відбувається ніби «саморемонт» ТЗ. При цьому ТЗ активно реагує на появу відмови. Звідси і назва методу резервування.

При *пасивному резервуванні* ТЗ відмова одного або навіть декількох елементів не впливає на його роботу. Елементи з'єднані постійно і перебудова структури не відбувається. ТЗ ніби пасивно чинить опір появі відмов елементів.

Як при активному, так і при пасивному методах резервування велике значення мають режими роботи резерву. Однак якщо в першому випадку для розрахунку важливо знати навантаження на резервні елементи до появи відмови, то в другому випадку – після появи відмови.

Активне резервування

Навантажений резерв

резервний елемент, який знаходиться в тому ж режимі, що й основний

Полегшений резерв

резервний елемент, який знаходиться в менш навантаженому режимі, ніж основний

Ненавантажени й резерв

резервний елемент, який практично не несе навантаження до початку виконання ним функцій основного елемента. При цьому приймається, що такий резервний елемент, знаходячись у резерві, відмовляти не повинен, тобто має в цей період «ідеальну» надійність

Пасивне резервування

з незмінним навантаженням

при відмові одного або декількох елементів не змінюється навантаження на елементи, що залишилися працездатними

з перерозподілом навантаження

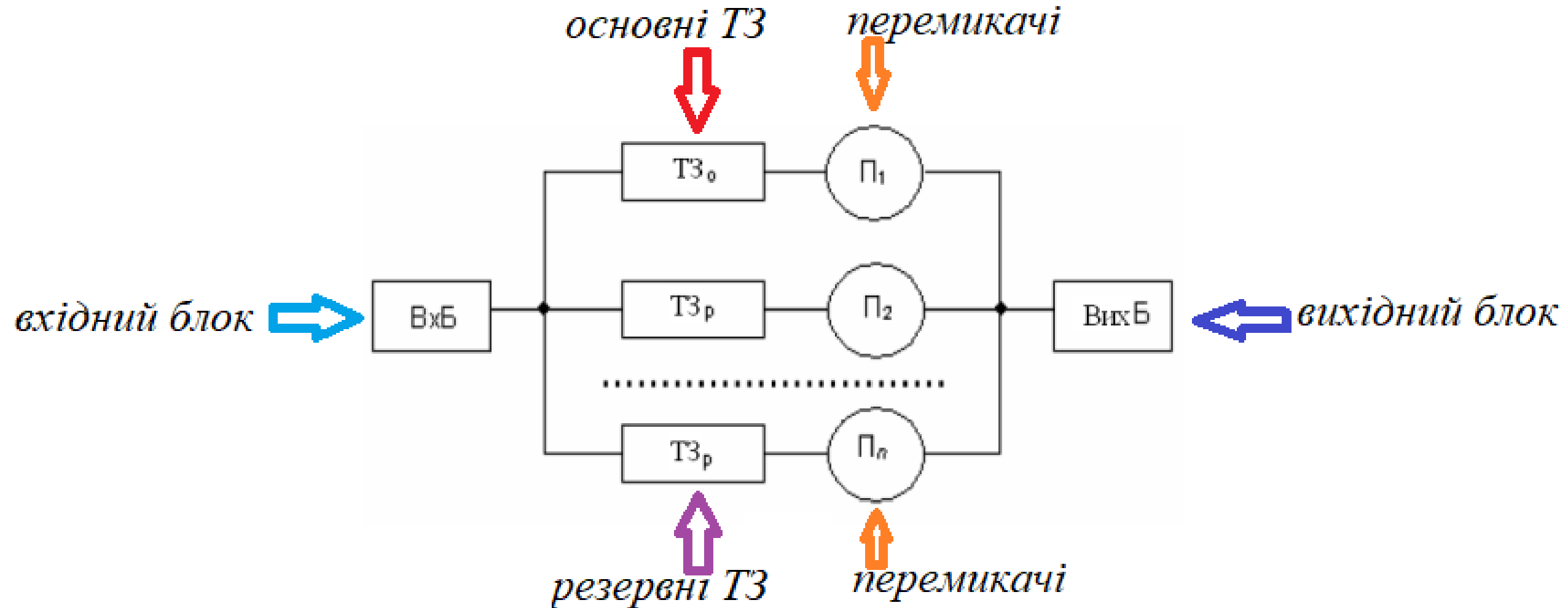
при відмові хоча б одного елемента змінюється, як правило, в бік збільшення, навантаження на елементи, які залишились працездатними

з навантажуваним резервуванням

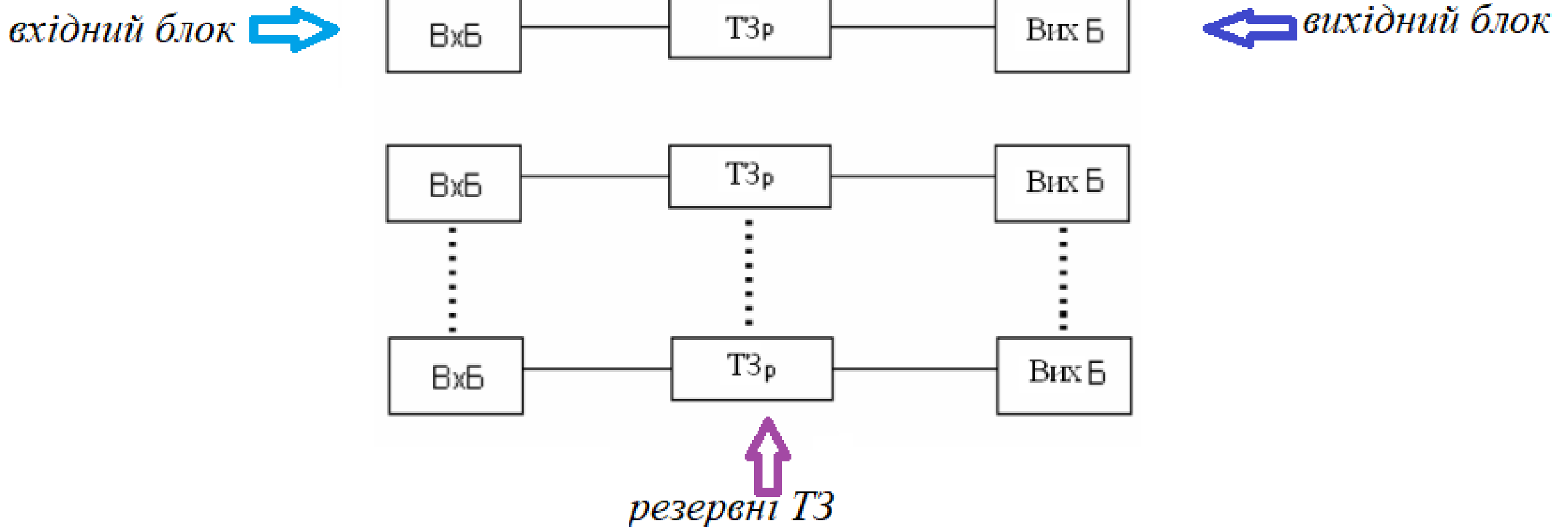
при відмові хоча б одного елемента технічний засіб виходить з ладу, але інтенсивність відмов елементів зменшена за рахунок того, що навантаження, яке повинен сприймати один елемент, сприймається декількома елементами



Загальне резервування полягає в резервуванні ТЗ в цілому і, завдяки своїй простоті, цей спосіб є найбільш відомим.



Автономне резервування – один з варіантів загального. Воно полягає в застосуванні декількох незалежних об'єктів, що виконують одну й ту ж саму задачу. Кожний з цих об'єктів має свій вхід і вихід і, звичайно, незалежні джерела живлення.



Роздільне резервування полягає в резервуванні ТЗ за окремими елементами або їхніми групами (ділянками). ТЗ з активним загальним резервуванням можна вважати частковим випадком ТЗ із окремими резервуваннями при одній ділянці резервування.

Одиничне резервування полягає в заміні елементів ТЗ елементарними резервованими схемами (звичайно пасивними). При одиничному резервуванні не потрібно складати спеціальних схем, а можна просто ставити на місце кожного елемента у функціональній схемі ТЗ його аналог – типову резервовану комірку.

Внутрішньоелементне резервування в резервуванні внутрішніх зв'язків елемента. Якщо при одиничному резервуванні використовуються схеми з існуючих елементів (комірок), то застосування внутрішньоелементного резервування пов'язано зі зміною конструкції елемента.

Змінне резервування застосовується в ТЗ із великою кількістю однакових елементів. Воно полягає в тому, що використовується невелике число резервних елементів, які можуть підключатися замість будь-якого з несправних елементів основного ТЗ.

При резервуванні ***з вибірковою схемою*** порівнюються сигнали на виході непарного числа паралельно працюючих засобів і в зовнішнє коло видається сигнал, наявний на виході більшості засобів.

За способом включення резервних елементів схеми резервування поділяються на схеми *з постійно включеним резервом* (постійне резервування) і схеми *резервування заміщенням*.

Постійне резервування – це таке резервування, при якому резервні елементи беруть участь у функціонуванні ТЗ нарівні з основними. При постійному резервуванні у випадку відмови основного елемента не потрібно спеціальних перемикальних пристроїв, що вводять у дію резервний елемент, оскільки він вводиться в дію одночасно з основним.

Резервування заміщенням – це таке резервування, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного. При використанні цього виду резервування необхідні контрольні і перемикальні пристрої для виявлення факту відмови основного елемента та переключення з основного на резервний.

Кратність резервування – це відношення кількості резервних елементів до кількості резервованих або основних елементів ТЗ.

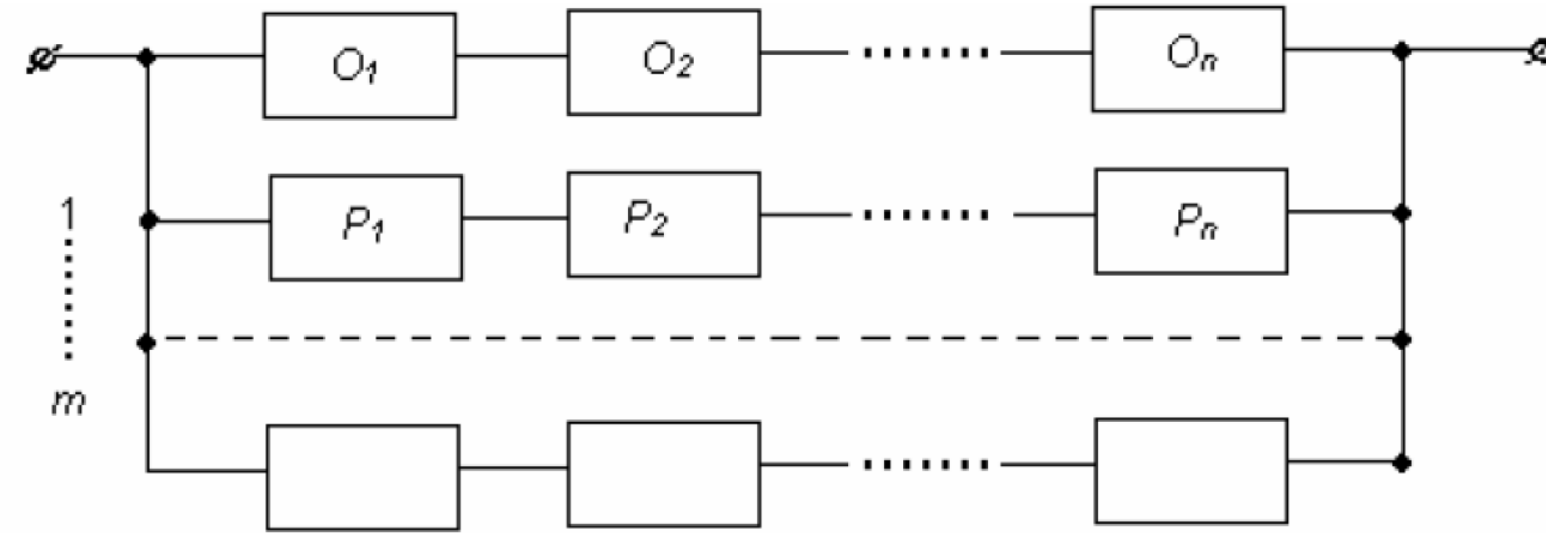
Розрізняють резервування з ***цілою*** і ***дробовою*** кратністю.

Резервування з цілою кратністю має місце, коли один основний елемент резервується одним і більше резервними елементами.

Резервування з дробовою кратністю має місце, коли два і більше однотипних елементи резервуються одним і більше резервними елементами. Найбільш розповсюдженим варіантом резервування з дробовою кратністю є такий, коли кількість основних елементів перевищує кількість резервних.

Резервування, кратність якого дорівнює одиниці, називається ***дублюванням***.

7.3 ЗАГАЛЬНЕ РЕЗЕРВУВАННЯ З ПОСТІЙНО ВКЛЮЧЕНИМ РЕЗЕРВОМ І ЦІЛОЮ КРАТНІСТЮ



Основне коло складається з n елементів – $O_1, O_2, \dots, O_n$. Кожне з m резервованих кіл містить у собі також n елементів $P_1, P_2, \dots, P_n$. Для простоти міркувань будемо вважати, що основне і резервні кола мають однакову надійність. Кратність такої схеми резервування дорівнює m, U .

Розрахунково-логічна схема для постійного включення резерву

Дана схема буде відповідати випадку, коли відмова ТЗ настає при відмові усіх $(m+1)$ кіл як основних, так і резервних. Будемо вважати також, що основне і резервне кола вмикаються в роботу одночасно (навантажений резерв), але використовується лише одне коло – основне. При відмові основного кола його функції без будь-якої перерви починає виконувати одне з резервних.

Ймовірність безвідмовної роботи резервованого ТЗ:

$$P_{\text{ТЗ}}(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1}$$

$P_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента протягом часу t ;

n – число елементів основного або будь-якого з резервних кіл;

m – кратність резервування.

Якщо час до відмови кожного кола резервованого ТЗ розподілено за експоненціальним законом, тоді для ймовірності безвідмовної роботи:

$$P_{\text{ТЗ}}(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda_0 t}]^{m+1}$$

Середнє напрацювання до відмови для експоненціального розподілу:

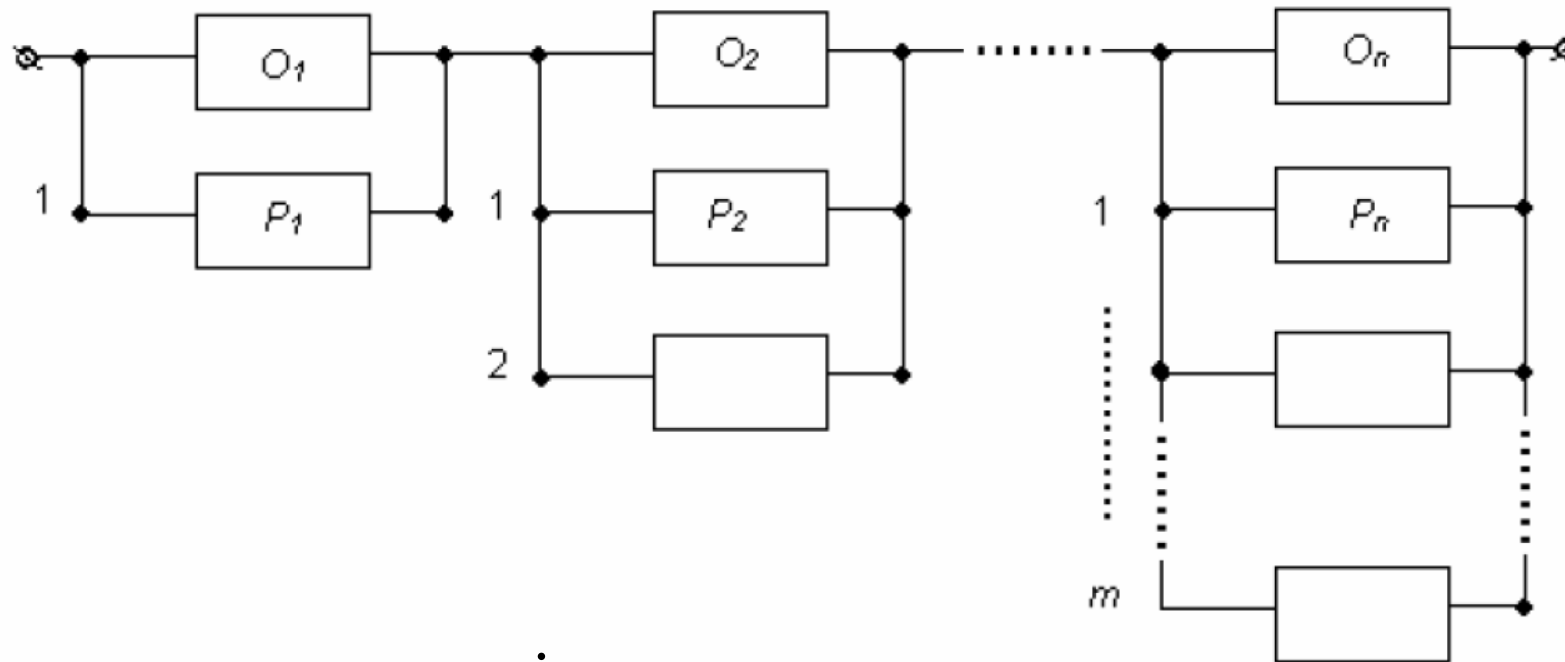
$$\overline{T}_{\text{ТЗ}} = \frac{1}{\lambda_0} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} = T_{\text{ср}_0} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1}$$

$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ – інтенсивність відмов основного кола або будь-якого з резервних;

$T_{\text{ср}_0}$ – середнє напрацювання до відмови основного кола або будь-якого з резервних.

7.4 РОЗДІЛЬНЕ РЕЗЕРВУВАННЯ З ПОСТІЙНО ВКЛЮЧЕНИМ РЕЗЕРВОМ І ЦІЛОЮ КРАТНІСТЮ

Розрахунково-логічна схема для роздільного резервування з постійно включеним резервом



При роздільному резервуванні кожен елемент основного кола O_n має свої резервні елементи P_n і відповідно свою кратність резервування m_i . В окремому випадку кратність резервування може бути й однаковою для всіх основних елементів.

Ймовірність безвідмовної роботи ТЗ із окремим резервуванням

$$P_{TЗ}(t) = \prod_{i=1}^n (1 - [1 - P_i(t)]^{m_i+1})$$

При експоненціальному розподілі ймовірність безвідмовної роботи

$$P_{TЗ}(t) = \prod_{i=1}^n (1 - [1 - e^{-\lambda_0 t}]^{m_i+1})$$

В окремому випадку при однаковій надійності основних і резервних елементів, а також однаковій кратності резервування отримаємо

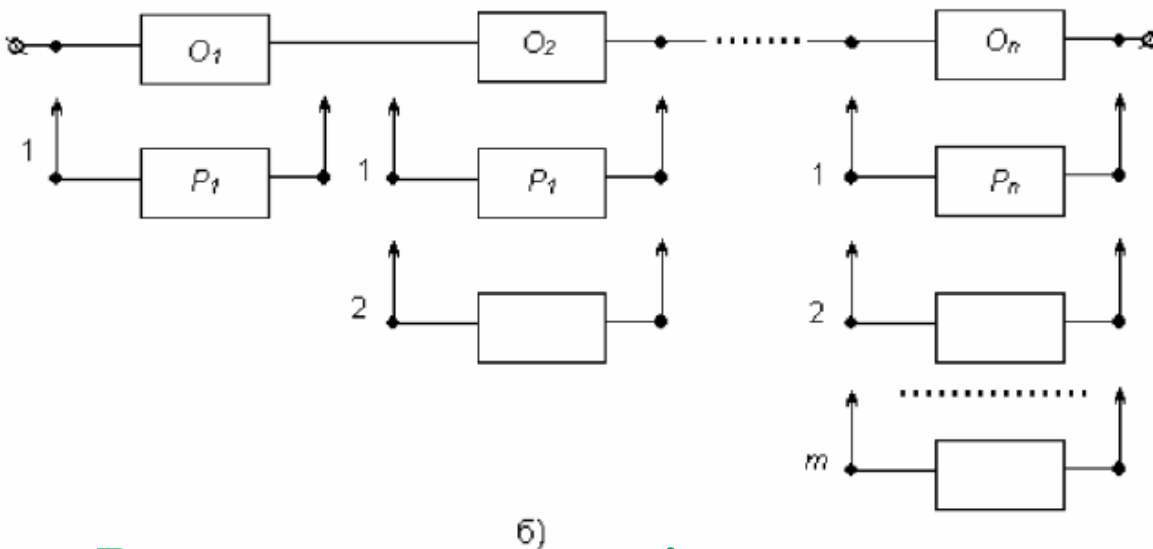
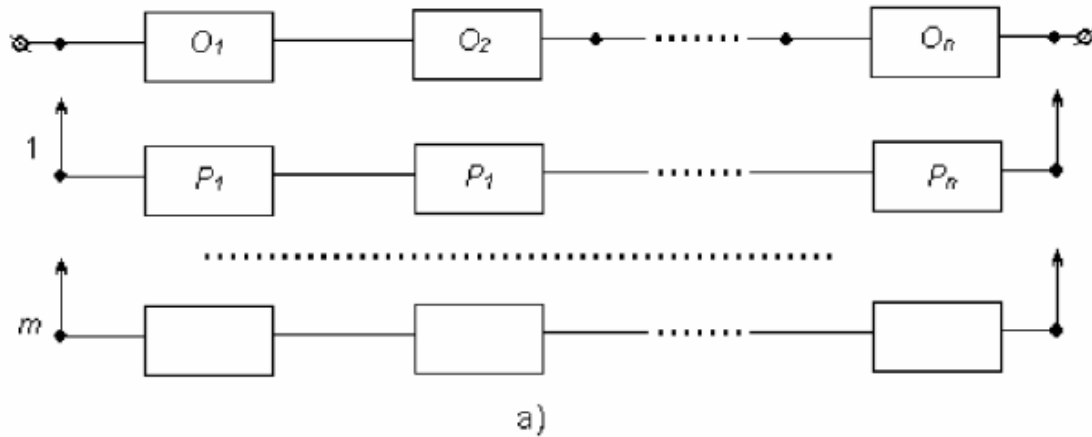
$$P_{TЗ}(t) = \prod_{i=1}^n (1 - [1 - e^{-\lambda_0 t}]^{m_i+1})^n$$

Середнє напрацювання до відмови

$$\bar{T}_{TЗ} = \int_0^{\infty} P_{TЗ}(t) dt = \frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)} \sum_{i=0}^m \frac{1}{v_i(v_i+1)\dots(v_i+n-1)}$$

$$v_i = \frac{i+1}{m+1}$$

7.5 ЗАГАЛЬНЕ І РОЗДІЛЬНЕ РЕЗЕРВУВАННЯ ЗАМІЩЕННЯМ З ЦІЛОЮ КРАТНІСТЮ



При резервуванні заміщенням у випадку відмови основного кола або елемента вручну або автоматично за допомогою спеціального перемикача в схему ТЗ включаються резервні кола чи елементи.

Відмова резервованого ТЗ при цьому настає після відмови останнього резервного кола чи елемента.

*Резервування заміщенням:
а) – загальне; б) – роздільне*

Якщо припустити наявність «ідеального» («абсолютно надійного») перемикача, то розрахунок ймовірності безвідмовної роботи ТЗ можна виконати за такою рекурентною формулою

$$P_{m+1}(t) = P_m(t) + \int_0^t P(t-T) a_m(T) dt$$

$P_{m+1}(t), P_m(t)$ – ймовірності безвідмовної роботи резервованого ТЗ кратності $(m+1)$ і m , відповідно;

$P(t-T)$ – ймовірність безвідмовної роботи основного кола (або елемента) ТЗ протягом часу $(t-T)$;

$a_m(T)$ – частота відмов резервованого ТЗ кратності m у момент часу T .

При загальному резервуванні заміщенням і навантаженим резервом для підрахунку $P_{ТЗ}(t)$ і $T_{ТЗ_{ср}}$, як правило, використовують вирази, що наведені на *слайді 163*.

При ненавантаженому резерві й експоненціальному законі розподілу часу безвідмовної роботи ймовірність $P_{ТЗ}(t)$ і середнє напрацювання $T_{ТЗ_{ср}}$ визначаються за такими виразами:

$$P_{ТЗ}(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!},$$

$$T_{ТЗ_{ср}} = T_{ср0} (m + 1),$$

$\lambda_0, T_{ср0}$ — інтенсивність відмови і середнє напрацювання до відмови основного кола ТЗ.

При полегшеному резерві й експоненціальному розподілі

$$P_{T3}(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_i t})^i \right],$$

$$T_{T3cp} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1 + iK},$$

$$a_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right);$$

$$K = \frac{\lambda_1}{\lambda_0};$$

λ_1 – інтенсивність відмов резервного кола до заміщення.

У випадку роздільного резервування заміщенням кожен елемент основного кола $O_1, O_2, \dots, O_n$ має свої резервні елементи P_i і відповідно свою контактність резервування m_i , що в окремому випадку може бути й однаковою для всіх основних елементів. Отже, поєднуючи в окрему групу кожен елемент основного кола разом зі своїми резервними елементами, ми отримуємо послідовне з'єднання окремих резервованих груп, що в сукупності і складають резервний ТЗ в цілому.

Розрахунок надійності кожної резервної групи елементів *можна зробити* за відомими формулами загального резервування заміщенням:

- для розрахунку навантаженого резерву (вирази слайд 166)
- для розрахунку ненавантаженого резерву (вирази слайд 171)
- для розрахунку полегшеного резерву (вирази слайд 172)

Усі наведені вище розрахункові співвідношення були отримані, як вказувалося, для випадку «ідеального» перемикача. На практиці всі *перемикачі*, безумовно, *мають відмови*, причому, будь-якого характеру. Серед них слід відзначити:

- а) неспрацювання при відмові основної апаратури, у результаті чого резервний елемент не буде включений замість відмовившого основного, що призведе до відмови резервної групи;
- б) помилкове спрацювання, у результаті чого відбудеться переключення на резерв при справній основній апаратурі, що призведе до зменшення часу до відмови групи в цілому;
- в) відмови, що виводять з ладу резервну групу в цілому.

Ймовірність безвідмовної роботи резервної групи з урахуванням ненадійності перемикача і при зазначених вище припущеннях може бути визначена за такою формулою

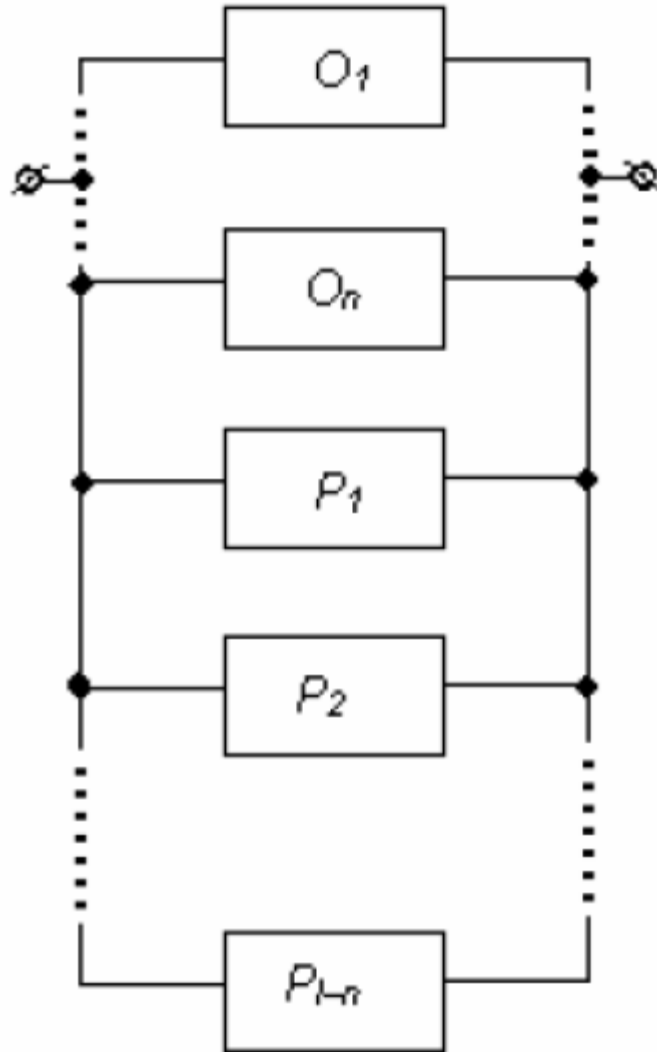
$$P_{\text{РГ}}(t) = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t) \cdot P_{\text{іП}}(t)] \right\} P_{\text{ВП}}(t),$$

$P_i(t)$ — ймовірність безвідмовної роботи основного або резервного елемента;

$P_{\text{іП}}(t)$ — ймовірність безвідмовної роботи сукупності елементів перемикача, що здійснюють включення i -го кола резервної групи;

$P_{\text{ВП}}(t)$ — ймовірність безвідмовної роботи сукупності елементів перемикача, відмова яких призводить до відмови резервної групи в цілому.

7.6 РЕЗЕРВУВАННЯ З ДРОБОВОЮ КРАТНІСТЮ



У розглянутій схемі використовується n основних і $(\ell-n)$ резервних елементів (ℓ – загальна кількість основних і резервних елементів).

При цьому $(\ell-n) > n$ і, отже, ми маємо дробову кратність резервування $m = (\ell - n)/n$.

Розрахунково-логічна схема загального резервування з постійно включеним резервом і дробовою кратністю

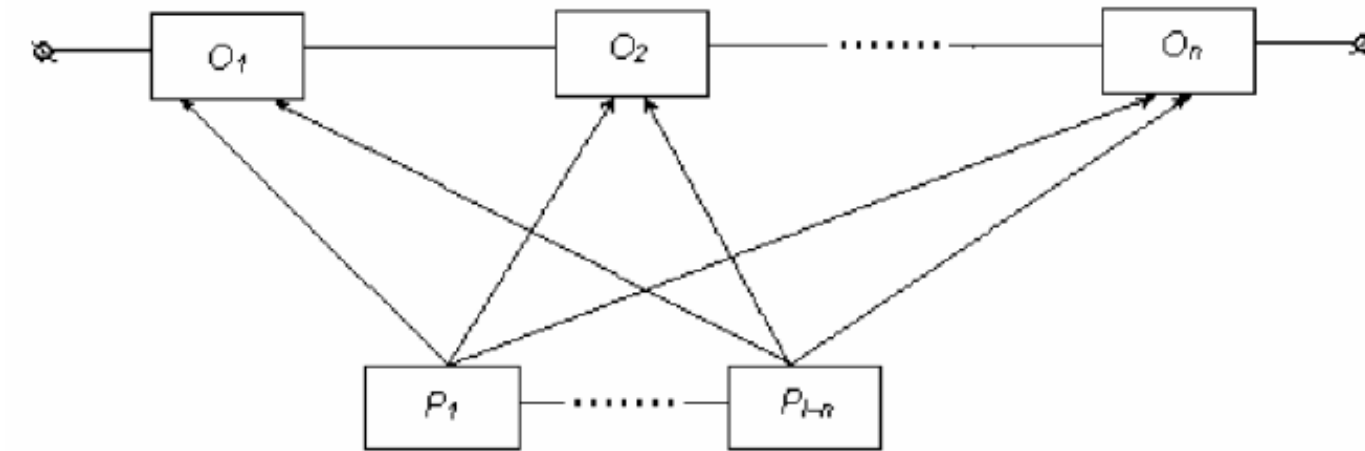
Вирази для ймовірності безвідмовної роботи і середнього напрацювання до відмови для розглянутого випадку загального резервування ТЗ із дробовою кратністю і постійно включеним резервом при експоненціальному розподілі:

$$P_{\text{ТЗ}}(t) = \sum_{i=0}^{\ell-n} C_{\ell}^i \cdot P_0^{(\ell-i)}(t) \sum_{j=0}^i (-1)^j C_i^j P_0^j(t),$$

$$T_{\text{ТЗср}} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{\ell-n} \frac{1}{n+1},$$

$P_0(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи основного або будь-якого резервного елемента.

Схема резервування заміщенням з дробовою кратністю за умови навантаженого резерву



Резервний ТЗ складається з n основних однотипних і $(\ell - n)$ резервних елементів, що знаходяться в навантаженому резерві ($n > (\ell - n)$). При відмові одного з основних елементів на його місце без перерви в роботі включається один з резервних. Причому резервні елементи також можуть відмовляти. Таких заміщень, що не порушують роботу ТЗ в цілому, може бути не більше $(\ell - n)$.

Середнє напрацювання до відмови такого ТЗ в припущенні абсолютно надійних перемикальних пристроїв і рівнонадійних елементів

$$T_{\text{ТЗср}} = \frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n+1} + \dots + \frac{1}{\ell} \right)$$

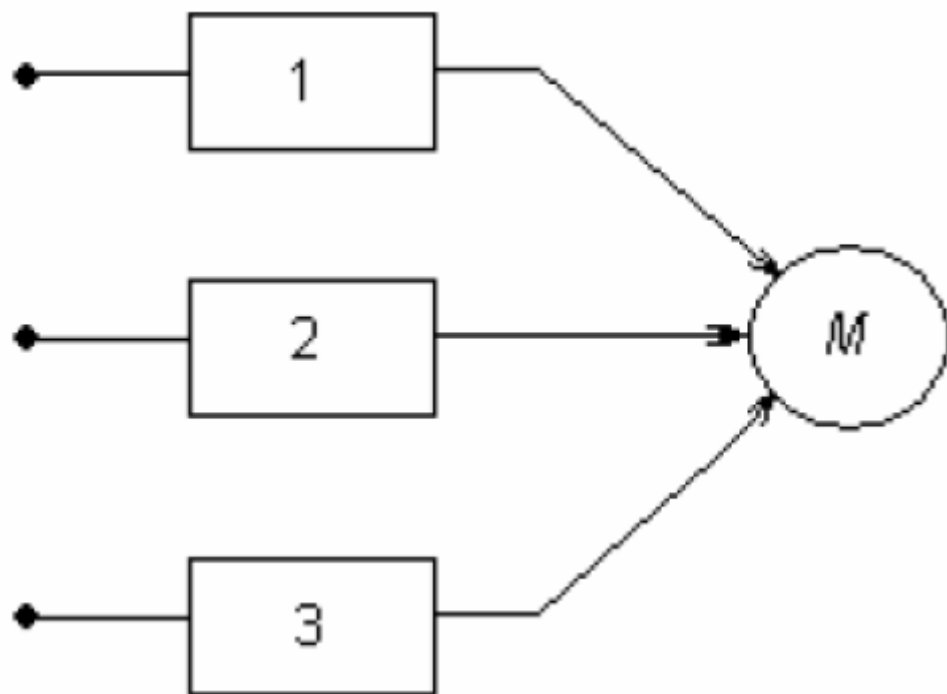
Ймовірність безвідмовної роботи резервного ТЗ протягом часу t

$$P_{\text{ТЗ}}(t) = \sum_{i=0}^{\ell-n} C_{\ell}^i [1 - P_0(t)]^i \cdot [P_0(t)]^{\ell-i}$$

Окремий випадок резервування з дробовою кратністю, а саме: *мажоритарне резервування*, що часто використовується в пристроях дискретної дії.

Мажоритарним резервуванням називається загальне паралельне резервування непарної кількості елементів (мінімально трьох), які одночасно виконують одну і ту ж програму, а рішення про безвідмовність приймається за правилом два з трьох. Такі системи мають також назву *системи з голосуванням*. Елемент, який виконує правило 2 з 3 називається *елементом голосування* або *елементом пріоритету*.

Схема мажоритарного резервування



Визначення ймовірності безвідмовної роботи ТЗ із мажоритарним резервуванням

$$P_{ТЗ}(t) = P_M(t) \cdot [3P_0^2(t) - 2P_0^3(t)],$$

$P_0(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи одного основного або резервного елемента.

При мажоритарному резервуванні замість одного елемента (каналу) включається три ідентичних елементи (канали), виходи яких подаються на мажоритарний орган M (елемент пріоритету). Якщо всі елементи такої резервної групи справні, то на вхід M надходять три однакових сигнали і такий же сигнал надходить у зовнішнє коло з виходу M . Якщо один із трьох резервованих елементів відмовив, то на вхід M надходять два однакових сигнали (істинних) і один сигнал помилковий. На виході M буде сигнал, що збігається з більшістю збіжних сигналів на його вході, тобто мажоритарний орган здійснює операцію визначення пріоритету або вибору за більшістю. Отже, умовою безвідмовної роботи є безвідмовна робота будь-яких двох елементів із трьох і мажоритарного органа протягом заданого часу t .

У випадку ненавантаженого резерву при резервуванні з дробовою кратністю (рис. на слайді 178), відмова одного з n основних однотипних елементів приводить до включення на його місці одного з $(\ell - n)$ резервних. При цьому за умовою елементи, що знаходяться в резерві, відмовляти не можуть до їх включення на місце відмовившого основного елемента. Такий вид резервування називають **ковзним**. Це таке резервування, коли всі резервні елементи можуть замінювати такі ж елементи основного кола.

Виходячи з цієї умови і з огляду на те, що в процесі нормального функціонування ТЗ у роботі знаходиться постійно n елементів, інтенсивність відмов кожного з яких дорівнює λ_0 , середнє напрацювання до відмови та ймовірність безвідмовної роботи в цілому за час t при експоненціальному розподілі можуть визначатися за такими виразами:

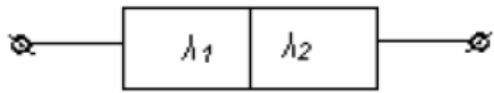
$$T_{TЗ_{\text{ср}}} = \frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{\ell - n + 1}{n} \right) = T_{\text{ср}0} \left(\frac{\ell - n + 1}{n} \right);$$

$$P_{TЗ}(t) = e^{-n\lambda t} \sum_{i=0}^{\ell-n} \frac{(n\lambda t)^i}{i!} = e^{-n\lambda t} \left[1 + n\lambda t + \frac{(n\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(n\lambda t)^{\ell-n}}{(\ell-n)!} \right],$$

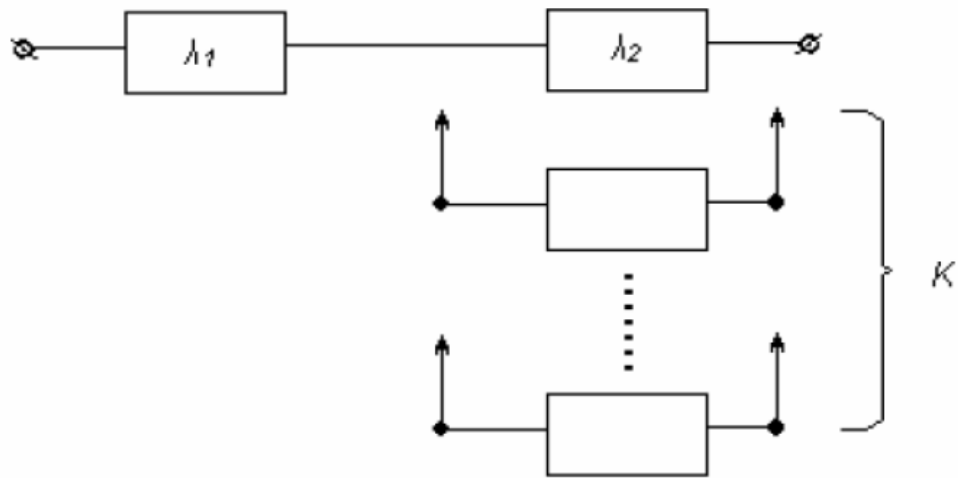
$\lambda_0 = n\lambda$ – інтенсивність відмов нерезервованого кола ТЗ;

$T_{\text{ср}0}$ – середнє напрацювання до відмови нерезервованого кола ТЗ.

7.7 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ТЗ З ІНФОРМАЦІЙНОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ



а)



б)

ТЗ, захищені самокорегувальним кодом (наближений розрахунок надійності)

У засобах цифрової обчислювальної техніки, системах телемеханіки широко використовуються так звані **самокорегувальні коди**, що дозволяють автоматично виявляти і виправляти помилки в одному або декількох розрядах, які з'являються в результаті збоїв або відмови елементів. При цьому відмова або збої не порушують нормального функціонування ТЗ. Пристрої, захищені самокорегувальними кодами, мають інформаційну надлишковість.

Аналіз надійності таких засобів з **інформаційною надлишковістю**, як правило проводиться двома шляхами: **наближенням і уточненням**.

При наближеному аналізі надійності ТЗ ділиться на дві частини: **захищену кодом від відмов і збоїв** та **незахищену**. Не захищена кодом частина – це сукупність елементів, для яких поява хоча б одної відмови або збою призводить до спотворення інформації на виході усього пристрою в цілому. Для захищеної частини залежно від застосовуваного коду визначається допустима кількість одночасно виправних помилок K (як правило $K=1$)

Якщо вважати, що сумарна інтенсивність відмов і збоїв незахищеної частини дорівнює λ_1 , а захищеної – λ_2 .

Тоді *умова безвідмовної роботи ТЗ* протягом часу t :

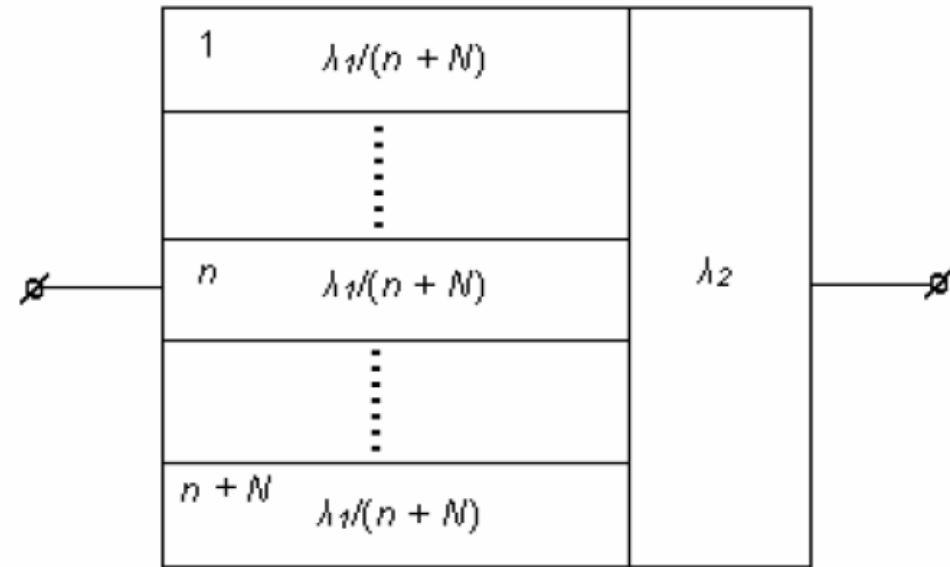
- у незахищеній частині засобу за час t не повинно відбутися жодної відмови або збою;
- у захищеній частині за той самий час може відбутися не більше K відмов і збоїв в сумі.

Ймовірність виконання цієї умови і дає ймовірність безвідмовної роботи ТЗ з інформаційною надлишковістю за час t

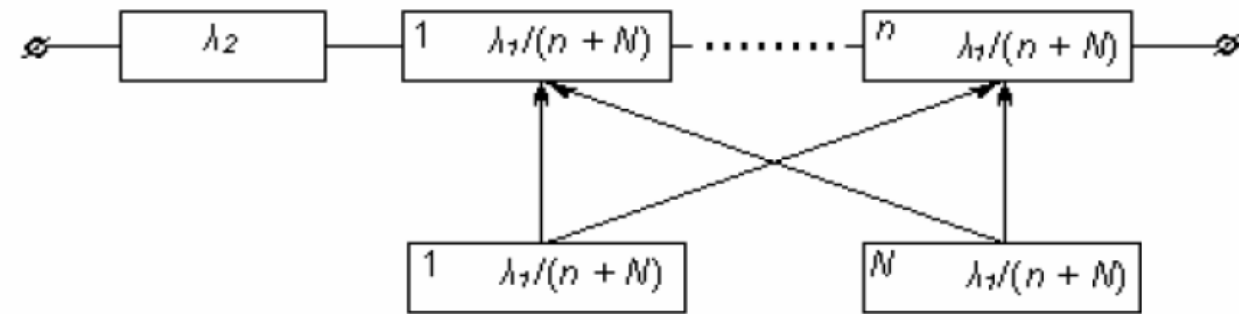
$$P_{\text{ТЗ}}(t) = e^{-\lambda_1 t} \sum_{i=0}^K \frac{(\lambda_2 \cdot t)^i}{i!} e^{-\lambda_2 t}$$

З умови безвідмовної роботи і даного виразу випливає, що ТЗ, захищені кодом, за надійністю еквівалентні послідовному з'єднанню незахищеної частини з K -кратно резервованою (ненавантажений резерв) захищеною частиною з ідеально надійним перемикачем (рис. б, слайд 182).

Уточнений аналіз надійності дозволяє врахувати структуру ТЗ, захищену самокорегувальним кодом. У ряді випадків захищена частина ТЗ може бути розбита на $(n+N)$ незалежних лінійок або розрядів (рис. а слайду 184). При цьому працездатність захищеної частини забезпечується відсутністю спотворень інформації в n лінійках або, іншими словами, допускається одночасна відмова N будь-яких лінійок (або одночасна поява збою в N будь-яких лінійках).



а)



б)

ТЗ захищені самокорегувальним кодом (уточнений розрахунок надійності)

Умова працездатності ТЗ протягом часу t для цього випадку. У незахищеній частині засобу за час t не повинно відбутися жодної відмови і збою. У захищеній частині за час t можуть відмовити (з'явитися збої) не більше N лінійок з $(n+N)$ лінійок. Звідси, ймовірність безвідмовної роботи ТЗ за час t буде визначатися за таким виразом

$$P_{\text{ТЗ}}(t) = e^{-\lambda_1 t} \sum_{i=1}^N C_{n+N}^i \cdot P^{n+N-i}(t) [1 - P(t)]^{-i},$$

Ймовірність безвідмовної роботи однієї лінійки захищеної частини ТЗ за часом t

$$P(t) = \exp\left(-\frac{\lambda_2 t}{n + N}\right)$$

З умови безвідмовної роботи і даного виразу випливає, що ТЗ, захищені кодом, за надійністю еквівалентні послідовному з'єднанню незахищеної частини з резервною групою, складеною з n основних і N резервних (навантажений резерв) лінійок, тобто групі з ковзним навантаженим резервом з абсолютно надійним перемикачем (рис. 6 слайду 184).

7.8 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ТЗ ІЗ ТИМЧАСОВИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

Використання тимчасового резервування поряд з розглянутими вище структурною та інформаційною надлишковістю є також ефективним способом підвищення надійності ТЗ.

При наявності тимчасової надлишковості на виконання ТЗ для будь-якої роботи відводиться час, свідомо більший, ніж мінімально необхідний. В цьому випадку можливі *два варіанти використання апаратури*:

- а) коли виконаний обсяг роботи при настанні відмови знецінюється;
- б) коли може відбуватися накопичення роботи, тобто виконаний обсяг роботи при настанні відмови не знецінюється.

Перший варіант. Нехай відмова апаратури знецінює роботу, виконану нею до моменту настання відмови. В цьому випадку робота буде усе-таки виконана в повному обсязі, якщо після відмови відбудеться відновлення апаратури і залишеного часу буде досить, щоб, почавши виконання роботи із самого початку, завершити її в установлений час. При цьому, природно, можна допустити появу декількох відмов, після кожної з яких апаратура відновлюється і щораз робота починається з початку, і так доти, доки робота не буде все-таки виконана в повному обсязі або не буде вичерпаний ресурс часу.

Як характеристики надійності апаратури з тимчасовою надлишковістю доцільно вибрати:

- ймовірність $P(t, V)$ виконання за заданий час t роботи обсягом V (причому обсяг роботи вимірюється мінімально необхідною тривалістю її виконання за умови відсутності відмови апаратури, а оскільки має місце тимчасова надлишковість, то $V < t$);
- середній час $T_{t,V}$, що витрачається на виконання роботи обсягом V на заданому проміжку часу t .

Для кращого розуміння викладеного розглянемо визначення зазначених характеристик на такому прикладі. Нехай робота, що повинна бути виконана на апаратурі, має обсяг (тривалість) V . При цьому інтервал V вкладається в проміжок часу t ціле число раз:

$$n = \frac{t}{V}$$

Перевірка справності апаратури відбувається наприкінці проміжку часу V . Якщо перша перевірка встановить відсутність відмови, то робота вважається успішно завершеною. У іншому випадку апаратура відновлюється (для простоти будемо вважати, що миттєво і з ймовірністю $P(0) = 1$), включається, і робота починає виконуватися з початку, після чого впливає друга перевірка і т. д.

Відповідно до такого режиму роботи може бути побудований такий ряд розподілу:

$$t_i, \quad V, \quad 2V, \quad \dots, \quad nV;$$

$$P_i, \quad p, \quad (1-p)p, \quad \dots, \quad (1-p)^{n-1}p,$$

t_i — можливі значення часу виконання роботи ($i = 1, 2, \dots, n$);

P_i — ймовірність виконання роботи за час t_i ;

$P = P(V)$ — ймовірність безвідмовної роботи апаратури протягом проміжку часу V .

Оскільки робота може бути виконана за час V або за час $2V$ і т. д., причому події $t_p = t_i$ (t_p – випадковий час виконання роботи) є подіями несумісними, то, застосовуючи теорему додавання ймовірностей, отримаємо

$$P(t, V) = p + (1-p)p + \dots + (1-p)^{n-1}p.$$

Скориставшись формулою для суми геометричної прогресії остаточно отримаємо

$$P(t, V) = 1 - (1-p)^n$$

Отриманий результат збігається з формулою для навантаженого $(n-1)$ -кратного резерву. Однак у даному випадку необхідна надійність забезпечується не додатковим включенням резервних елементів, а за рахунок виділення додатково часу на виконання роботи одним апаратом.

Середній час, що витрачається на виконання роботи обсягом V на заданому проміжку часу t , легко може бути визначений як математичне сподівання випадкової величини t_p – випадкового часу виконання роботи – і без виведення в остаточному вигляді дорівнює

$$T_{t,V} = V \cdot \frac{1 - (1-p)^n (1 + np)}{p}$$

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1. Васілевський, О. М. Нормування показників надійності технічних засобів : навч. посіб. / О. М. Васілевський, О. Г. Ігнатенко. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 160 с.
2. Васишин, В.І. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем : навч. посіб. / В.І. Васишин, С.В. Женжера, О.В. Чечуй та ін. - Х. : ХНУПС, 2018. - 268 с.
3. Основи теорії надійності, контролю та діагностування засобів вимірювальної техніки : навч. посіб. / Ю. П. Белокурський, О. В. Дегтярьов, О. А. Єгорова та ін. ; за ред. А. Б. Єгорова. – Х. : ХНУРЕ, 2011. – 174 с.
4. Метрологічна надійність. Конспект лекцій / О.І. Богатов, Р.Е. Пащенко, А.О. Коваль. – Харків : Харк. нац. автомобільно-дорожній ун-т, 2018. – 95 с.

Допоміжна

1. Казак, В.М. Надійність та діагностика електрообладнання : навч. посіб. / В.М. Казак, Б.І. Доценко, В.П. Кузьмін та ін. ; ред. В.М. Казак. – К. : НАУ, 2013. – 280 с.
2. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. – вид. офіційне. – К. : Держстандарт України, 1995. – 123 с.
3. ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. –вид. офіційне. – К. : Держстандарт України, 1998. – 42 с.
4. ДСТУ 3524-97. Надійність техніки. Проектна оцінка надійності складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. Основні положення. – вид. офіційне. – К. : Держстандарт України, 1999. – 21 с.
5. ДСТУ 3942-2000. Надійність техніки. Плани випробувань для контролю середнього наробітку до відмови (на відмову). – вид. офіційне. – К. : Держстандарт України, 2000. – 30 с.
6. Кустов, В.Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем залізничної автоматики : навч. посіб. – Харків : УкрДАЗТ, 2008. – 218 с.