

ЛЕКЦІЯ №11

Методи забезпечення надійності технічних систем

Фактори, що впливають на надійність технічних систем

У процесі виробництва і експлуатації технічних систем діє безліч різних факторів, що впливають на її надійність. Всю множину факторів, що впливають на обладнання складних систем, можна розділити на дві групи:

- 1) апаратні (технічні), тобто такі, що залежать від стану системи та її елементів;
- 2) неапаратні, тобто такі, що не залежать від стану системи, але впливають на функціональну надійність.

На рис. 11.1 наведено класифікацію цих факторів.

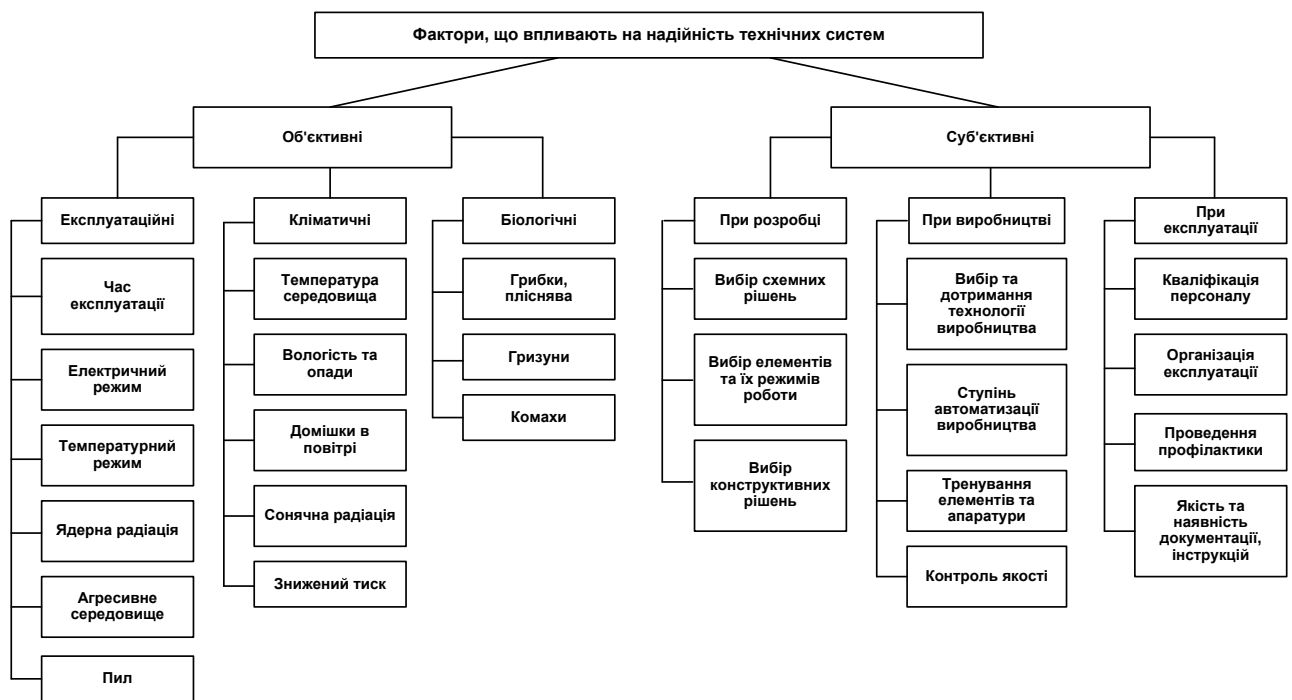


Рис.11.1. Класифікація факторів впливу на надійність техніки

Всі фактори можна підрозділити на дві групи: об'єктивні чинники і суб'єктивні фактори.

До групи об'єктивних факторів належать експлуатаційні, кліматичні та біологічні.

До групи суб'єктивних факторів належать помилки людей під час розробки, виробництва і експлуатації. До факторів, що визначають надійність технічної системи на етапах розробки і виробництва, відносяться: вибір схемних рішень, вибір елементів і режимів їх роботи, вибір конструктивних рішень, вибір і дотримання технології виробництва, автоматизація виробництва, тренування елементів і апаратури, контроль якості тощо.

30% падіння надійності припадає на такі фактори як: час експлуатації, електричні режими, температура середовища, вологість та атмосферні опади, знижений тиск, сонячні та інші види радіації і різного роду домішки в повітрі, механічні навантаження (перевантаження, удари і вібрації), біологічні чинники (грибки, цвіль, комахи і гризуни), діяльність обслуговуючого персоналу (кваліфікація, проведення профілактичних заходів, організація експлуатації, наявність інструкцій з експлуатації даного типу апаратури) і т. п.

Час експлуатації. Час експлуатації є одним з основних факторів, що визначають надійність апаратури на всіх етапах. Технологічні і конструктивні недоліки найчастіше виявляються в перший період експлуатації, коли інтенсивність відмов у багато разів більше, ніж в нормальний період експлуатації; так, наприклад, для електронних ламп вона в 2-5 разів

вища. Вихід з ладу конденсаторів в більшості випадків відбувається за пробою діелектрика, в результаті чого до 70% усіх, що вийшли з ладу конденсаторів припадає на цей період експлуатації. Таким чином, у період припрацювання виявляються багато явних та прихованих дефектів апаратури в цілому та її елементів. У цей же період здійснюється вихідний контроль обладнання на виробництві.

Найбільш важливу апаратуру прийнято піддавати попередньому тренуванню протягом певного часу з тим, щоб ще до експлуатації у споживача вона виробила час припрацювання і ненадійні елементи і вузли були своєчасно усунені.

На третьому етапі роботи настає після кілька сотень або тисяч годин зростання інтенсивності відмов, незворотних змін параметрів і характеристик елементів. Причини старіння: складні процеси у діелектриках і провідниках, окислення поверхні провідників, порушення механічної та електричної міцності матеріалів, порушення герметизації, підвищення водопроникності та ін.

До конструктивних факторів належать:

- вибір структурної та функціональної схеми, способів резервування та контролю;
- вибір комплектуючих елементів та матеріалів, а також робочих умов, в яких повинні працювати комплектуючі елементи;
- призначення вимог до допусків на технічні характеристики елементів;
- розробка експлуатаційної документації та ін.

До виробничих факторів належать фактори, що виникають в процесі підготовки виробництва, виготовлення та виробничого контролю виробів:

- вхідний контроль якості матеріалів та елементів, що отримані від підприємств постачальників;
- організація технологічного процесу виготовлення обладнання;
- контроль якості продукції на всіх етапах технологічного процесу;
- кваліфікація виробників;
- забезпечення якості та контроль монтажу та налагодження обладнання систем;
- умови роботи на виробництві та інше.

При проектуванні та конструюванні об'єкту закладається його надійність.

До експлуатаційних факторів відносяться фактори, що з'являються поза сферою проектування та виробництва об'єктів. Вони знижують надійність роботи виробу, коли обслуговування виробу проводиться недостатньо кваліфіковано, або коли режим його експлуатації не відповідає режиму встановленому при експлуатації. При високій якості обслуговування експлуатаційна надійність може підвищуватись в порівнянні з прогнозованою на етапі проектування та виробництва. За характером дії на об'єкт експлуатації фактори можна поділити на об'єктивні (дії зовнішнього середовища) та суб'єктивні (дія обслуговуючого персоналу). Об'єктивні фактори, що впливають на надійність об'єктів, можна класифікувати на дві групи: зовнішні та внутрішні фактори.

До зовнішніх факторів відносяться впливи, що обумовлені зовнішнім середовищем та умовами застосування. Це, по-перше, кліматичні фактори, механічні дії (вібрація, удари), електромагнітні та радіаційні випромінювання, тощо.

Внутрішні фактори пов'язані із зміною параметрів об'єкта та конструкційних матеріалів (старіння, корозія, тощо). Ці зміни відбуваються в часі під впливом зовнішніх факторів.

Під суб'єктивними експлуатаційними факторами, що впливають на надійність, розуміють:

- кваліфікацію обслуговуючого персоналу;
- організацію та якість технічного обслуговування та регламентних робіт;
- методи та способи організації експлуатації об'єктів;
- організація збору та аналізу відомостей про надійність об'єктів.

Неапаратні фактори, які впливають на надійність систем виникають поза сферою

проектування та виробництва цифрової техніки.

До них належать:

- якість алгоритмів та програм для виробів з програмним керуванням;
- кваліфікація обслуговуючого персоналу та якість обслуговування апаратури;
- умови роботи апаратури, в тому числі температура, вологість, завади, тощо.

До кліматичних факторів належать:

1. Температура навколишнього середовища. Тепловий вплив навколишнього повітря поширюється на всі складові частини виробу постійно, незалежно від того, працює виріб або знаходиться на зберіганні (не працює). Температура навколишнього середовища залежить від кліматичних зон, в яких відбувається експлуатація технічного об'єкту. На земній кулі розрізняють чотири теплові кліматичні зони: помірну, холодну, гарячу суху і гарячу вологу.

При низьких температурах істотно змінюються властивості багатьох матеріалів: пластмаси втрачають міцність, гумові вироби стають крихкими і розтріскуються, чавун і пружинні сталі стають ламкими, припої, що містять олово, при температурі нижче $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ схильні до відставання від місць спайки. При низьких температурах відбувається загусання мастил і масел, унаслідок чого виникають відмови в гідравлічних системах і заїдання рухомих частин виробу. Високі температури призводять до перегріву приладу і виходу з ладу.

Технічна апаратура потребує особливих режимів роботи:

- температура (5-40) $^{\circ}\text{C}$
- вологість (60-70)%
- атмосферний тиск (750 ± 30) мм.рт.ст.

2. Вологість повітря. Розрізняють підвищену (більше 80 %) і понижену (менше 40 %) відносну вологість повітря, яка залежить від кліматичних зон. Наша країна розташовується в зоні з помірною (ближче до підвищеної) вологістю. Підвищена і знижена вологість повітря негативно впливають на технічні прилади. Знижена вологість у сполученні з високою температурою призводить до висихання деяких матеріалів, в результаті чого відбувається стимуляція процесів старіння деталей, виготовлених з цих матеріалів.

Підвищена вологість є одним з факторів, що найбільш негативно впливають на технічні об'єкти. Вона прискорює корозію металів. Корозія металів - це фізико-хімічний процес, що відбувається між металом і навколишнім середовищем, в результаті якого змінюються властивості, як самого металу, так і властивості середовища, в якому він знаходиться. Продукти корозії чорних металів, яка утворилася у вологому середовищі, являють собою гідратовані оксиди металів і називаються іржею. Вологість також змінює діелектриків. Зволоження ізоляційних матеріалів в різних блоках і пультах призводить до появи у них відмов і несправностей.

Причиною утворення вологи в блоках, пультах, редукторах, коробках і ємностях може бути конденсація парів на холодних поверхнях деталей при значних коливаннях температури. Волога є основною причиною ненадійної роботи трансформаторів, дроселів.

3. Тиск повітря. Знижений тиск, що виникає на висоті 150 м і більше, що викликає погіршення пуску і роботи двигунів внутрішнього згорання. Зниження тиску більшою мірою впливає на працездатність обслуговуючого персоналу.

4. Пісок, пил і інші домішки повітря. На надійність ТО сильний вплив спричиняє забрудненість повітря механічними і хімічними домішками. Пил, проникаючи в мікро тріщини ізоляційних матеріалів, значно знижує ізоляційні властивості останніх.

Пил і особливо пісок, що знаходяться в повітрі, руйнують лакофарбові та інші захисні покриття; крім того, потрапляючи в рухливі сполучення механічних вузлів і механізмів, вони викликають прискорене зношення тертьових поверхонь.

Крім пилу в атмосфері можуть бути різні шкідливі хімічні домішки (солі, оксиди, кислоти), що викидаються машинами і промисловими підприємствами. Ці гази збільшують корозію металів, прискорюють процес старіння в пластмасах та інших неметалевих матеріалах. Ступінь впливу цих домішок значно збільшується при наявності підвищеної вологості.

5. Сонячна радіація. В процесі експлуатації ТО на відкритому повітрі всі його

зовнішні поверхні піддаються дії прямих сонячних променів, які мають теплове і ультрафіолетове випромінювання.

Теплове випромінювання призводить до підвищення температури всіх складових частин технічних об'єктів. Дія цього фактору температури була розглянута раніше.

Вплив ультрафіолетового випромінювання призводить до активізації фізико-хімічних процесів старіння багатьох деталей, виготовлених з гуми, пластмаси, а також лакофарбових покриттів і різних експлуатаційних та консерваційних матеріалів. Таким чином, в результаті дії сонячного світла змінюються діелектричні властивості і колір пластичних мас, ряд пластмас стають крихкими, на гумових виробах утворюється тендітна кірка; поверхні таких виробів розтріскуються. Пофарбовані поверхні починають вицвітати і лущитися.

Біологічні фактори викликають особливий вид пошкоджень. Біопошкодження - особливий вид руйнування матеріалів, пов'язаний з впливом біофакторів, таких як мікроорганізми (бактерії, гриби), комахи, гризуни, птахи.

Біофактори можуть проявлятися у вигляді:

- прямого використання різних матеріалів в якості джерел живлення;
- безпосереднього впливу продуктів життєдіяльності мікроорганізмів на матеріали;
- утворення речовин, які каталізують корозійні реакції.

Біопошкодження можуть бути фізичні або хімічні. Фізичні біопошкодження викликаються ссавцями, птахами і т.п., а хімічні — ферментативними реакціями, що лежать в основі вражаючої дії мікроорганізмів.

На активність мікроорганізмів впливають зовнішні фізичні і хімічні фактори.

Фізичні фактори — це вологість середовища, концентрація речовин у водних розчинах, осмотичний тиск, температура навколишнього середовища та радіація.

Хімічні фактори — це склад і реакція середовища, а також її окисно - відновлювальні дії. У навколишньому середовищі можуть бути речовини, які стимулюють чи пригнічують життєдіяльність мікроорганізмів.

До біологічних факторів відносяться:

1. Грибки, цвіль. З усіх біологічних факторів вони є найбільш небезпечними для техніки. Грибки можуть розвиватися на поверхні будь - яких матеріалів, якщо на них є шар органічного пилу.

Найбільш сприятливими умовами розвитку більшості видів плісняви є висока відносна вологість (більш 85 %), температура 20-30 °С і нерухомості повітря. Ці умови відповідають жаркому тропічному клімату. З пониженням температури нижче 7 °С і підвищенням її більш 40 °С, а також при відносній вологості нижче 75 % активність росту і розвитку цвілі значно знижується. Вплив грибків і цвілі на елементи техніки викликає наступні наслідки:

- пошкодження або руйнування натуральних волокнистих матеріалів (текстилю, пряжі, бавовни, вовни, льону, джуту, гуми, багатьох пластичних мас, дерева, шкіри, паперу і картону), оптичних деталей;
- руйнування лакофарбових покриттів, що містять рослинні покрови та тваринні жири;
- прискорення процесу корозії металів;
- порушення контактів, короткі замикання, пробій ізоляції.

Найбільш часто покриваються цвільлю вироби і запасні частини до них, якщо вони зберігаються у сирих, але теплих і не провітрюваних приміщеннях, під брезентом у теплому і вологому місці.

2. Комахи. З комах найбільш небезпечними для елементів є моль і терміти. Моль руйнує пластмаси, дерев'яні деталі, шкіру та інші органічні матеріали. Мокрі продукти розкладання комах, які осідають на струмонесучих частинах електроустаткування, можуть призвести до витоків струму і навіть до коротких замикань.

3. Гризуни. Вони призводять до пошкодження різних кабелів і проводів, це

призводить до порушення функціонування електричних ланцюгів і виникненню коротких замикань.

Таким чином вплив зовнішніх та внутрішніх чинників на роботу апаратури необхідно передбачати ще на етапі проектування, вводячи в конструкцію попередні схеми захисту або покращення міцності та правильно розробляти рекомендації по експлуатації. А працівниками головне - дотримуватися рекомендацій на експлуатацію і не використовувати прилади не за призначенням і в умовах не передбачених для їх роботи.

Резервування - один з ефективних шляхів забезпечення високої надійності технічних систем

При проектуванні технічних систем різного призначення забезпечення надійності вирішується шляхом застосування комплектуючих елементів з високою надійністю. Однак, як свідчить досвід, створення складних електронних систем з використанням великої кількості елементів знижує рівень надійності таких систем.

Одним з найбільш ефективних методів підвищення надійності систем (пристроїв) на етапі проектування є резервування.

Резервування – це спосіб забезпечення надійності системи (об'єкта) за рахунок використання додаткових засобів та можливостей, надлишкових по відношенню до мінімально необхідних.

Розрізняють наступні види резервування: режимне, параметричне, функціональне, інформаційне, погодинне та структурне.

Режимне резервування – це один із способів підвищення безвідмовності системи шляхом використання елементів в полегшеному режимі роботи (з коефіцієнтом навантаження K_n не більше 0,5–0,8 від номінального), що призводить до значного зменшення інтенсивності відмов елементів, в середньому в 2 – 5 раз.

Різновидом режимного резервування є погодинне резервування, коли складові частини (блоки) системи під час її застосування працюють неодноразово, тобто циклами.

Інтенсивність відмов системи, що складається з блоків, які працюють неодноразово, визначається за формулою:

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{1}{t} * \sum_{i=1}^n \lambda_i * (t_i^k - t_i^n) = \frac{1}{t} * \sum_{i=1}^n \lambda_i * \Delta t_i, \quad (11.1)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента (блока) на інтервалі часу Δt_i ;

$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ - проміжок часу на протязі якого працює пристрій, що розглядають; n – кількість інтервалів t_i .

Параметричне резервування – спосіб підвищення безвідмовності роботи пристрою шляхом вибору оптимального режиму роботи його елементів. При цьому оптимальним режимом слід вважати таку комбінацію параметрів елементів, яка б забезпечувала стабільність роботи системи при імовірних впливах на неї різноманітних зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів. Для цього будують залежність визначального параметра Y пристрою від параметрів елементів X_i ($x_{i \min} \leq x_{i \text{ ном}} \leq x_{i \max}$) і визначають робочу область визначального параметра (область безвідмовної роботи системи).

Таким чином, відхилення визначального параметра Y за допустимі границі $y_{\min}$ та $y_{\max}$ при зміні параметрів X_i за границі $x_{i \min}$ та $x_{i \max}$ є критерієм параметричної відмови системи. Отже, обравши оптимальну робочу точку, в пристрій вводять параметричну надмірність – параметричне резервування.

Функціональне резервування – це резервування з застосуванням схем, мало критичних до порушення працездатності окремих елементів системи. Підвищення надійності при даному способі резервування досягається шляхом заміни елементів, що відмовили, більш інтенсивною роботою інших елементів, тобто за рахунок збільшення навантаження на елементи, що залишились працездатними.

Функціональне резервування найбільш часто використовують в пристроях, які використовують, так званий, зворотній зв'язок. Прикладом пристроїв з функціональним резервуванням є автоматичний регулятор підсилення (АРП). Завдяки схемі АРП вихід з ладу окремих елементів не призводить до порушення працездатності приймаючого пристрою, оскільки зміни режиму роботи окремих елементів внаслідок виходу з ладу одного елемента, будуть скомпенсовані схемою АРП.

Інформаційне резервування базується на використанні надмірної інформації, яка дозволяє підвищити достовірність інформації, що передається по каналам зв'язку, тим самим підвищуючи надійність пристрою. Прикладом цього може бути багаторазова передача по каналу зв'язку одного і того ж інформаційного повідомлення. В цьому випадку, введення інформаційної надмірності шляхом багаторазового повторення повідомлення знижує швидкість передачі, але суттєво підвищує достовірність його при прийомі.

Інформаційне резервування застосовується не лише в апаратурі передачі даних але й в інших технічних системах. Так, в обчислювальних пристроях широко застосовують самокорегуюче кодування для визначення імовірних помилок, що викликані збоями окремих систем. Інформаційне резервування можливе лише за умови введення структурної надмірності.

Погодинне резервування – резервування з використанням резервів часу. Такий вид резервування може бути реалізований шляхом планування часу, заздалегідь більшого за мінімально необхідний для виконання поставлених задач. В цьому випадку, при відмові або виході з ладу пристрою в процесі роботи, у нього буде резерв часу на пошук і усунення несправності та завершення роботи, що була перервана виходом з ладу пристрою. Відмови та несправності, які виникають при цьому на протязі резервного часу, при розрахунках надійності не враховують.

Структурне резервування – це резервування із застосуванням резервних елементів структури об'єкта. Його застосовують у випадках, коли неможливо звичайними методами забезпечити необхідну надійність.

Структурне резервування застосовують на стадії проектування або в процесі експлуатації об'єкта шляхом установа двох або більше однотипних об'єктів. Таке резервування характеризується паралельним з'єднанням елементів (блоків, пристроїв) на логічній схемі, в якому лише відмова усіх паралельно з'єднаних елементів призводить до виходу всього з'єднання в цілому.

В залежності від реакції резервованої системи на виникнення відмови розрізняють активне та пасивне резервування.

Активним називають резервування, при якому основний (робочий) елемент замінюється резервним, тобто відбувається перебудова структури системи.

При активному резервуванні розрізняють наступні основні способи структурного резервування (рис.11.2):

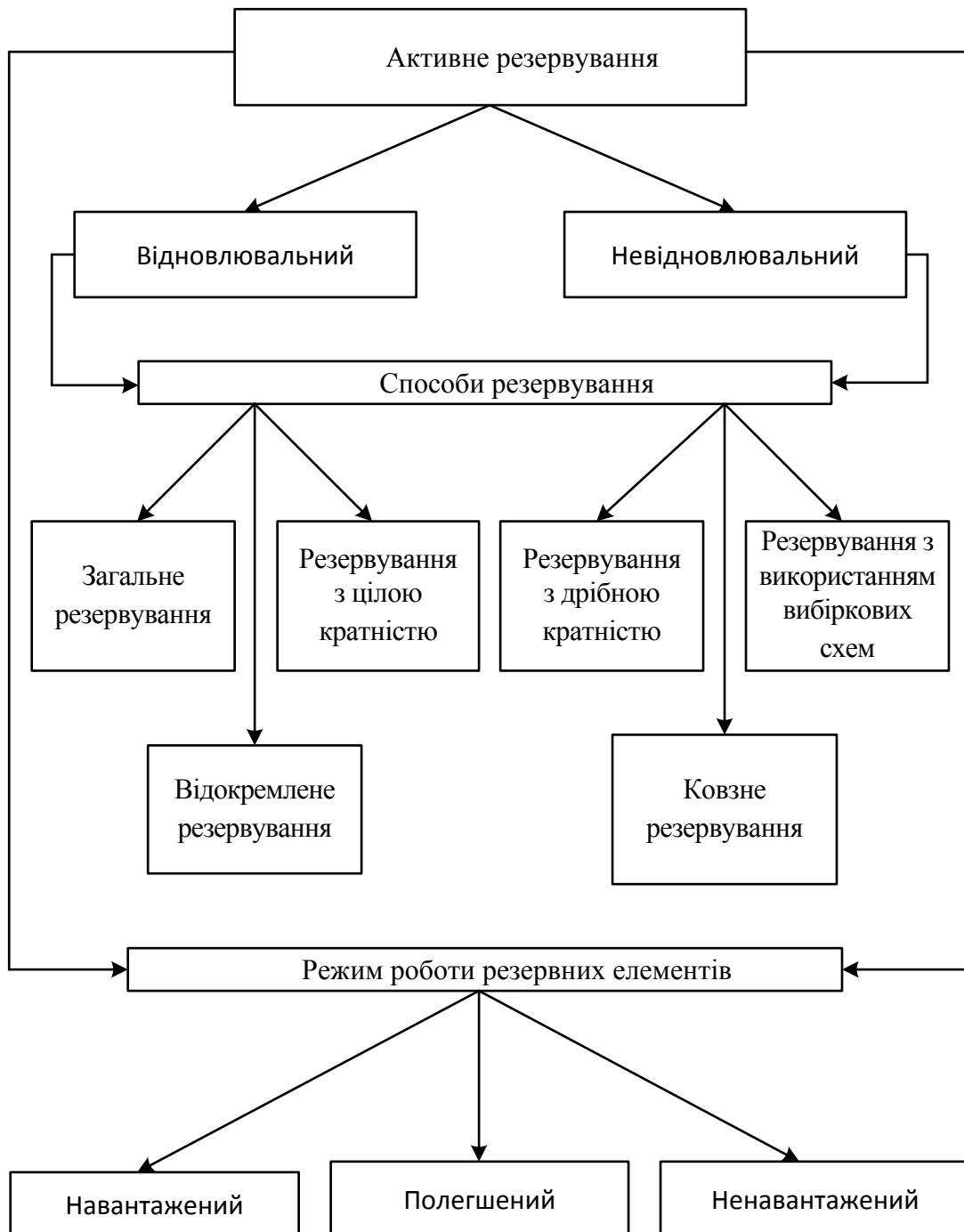
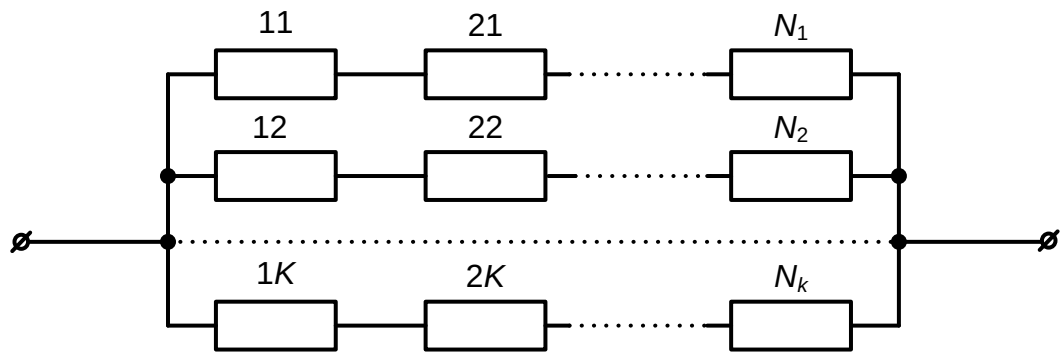
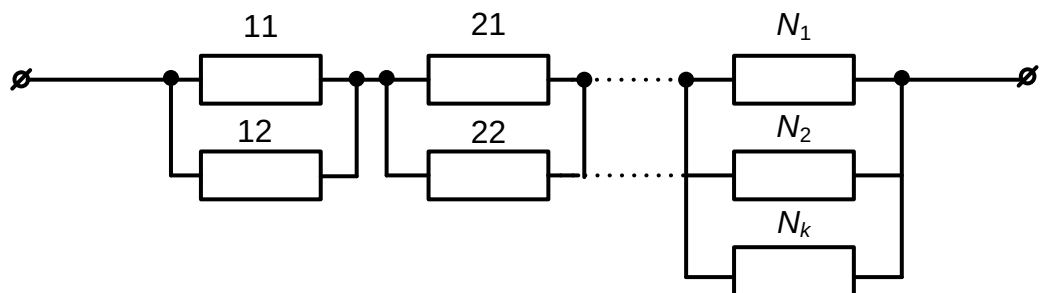


Рис.11.2. Способи активного резервування

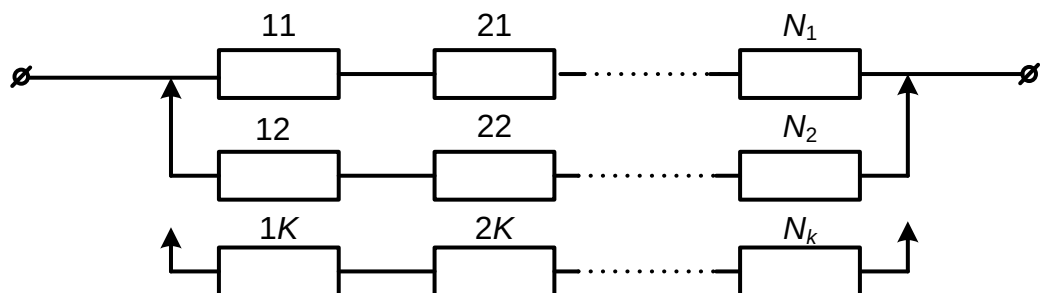
- ◆ **загальне** резервування, при якому резервується об'єкт в цілому (рис. 11.3,а);
- ◆ **роздільне** резервування, при якому резервуються окремі елементи об'єкта або їх групи (рис.11.3,б);
- ◆ **змішане** резервування, коли в одному і тому ж об'єкті застосовують декілька способів резервування (рис.11.4,б);
- ◆ **ковзне** резервування, при якому група основних елементів об'єкта резервується одним або кількома елементами, кожен з яких може замінити будь-який основний елемент, що вийшов з ладу (рис.11.4,в);



а)



б)



в)

Рис. 11.3. Логічні схеми надійності при різних способах структурного резервування:

- а – загальне резервування з постійним включенням резерву;
- б – по елементне резервування з постійним включенням резерву;
- в – загальне резервування з включенням резерву заміщенням.

♦ резервування з використанням **вибіркових схем** (**мажоритарне** резервування), при якому забезпечується стійкість об'єктів до випадкових збоїв або відмов, які самоусуваються (рис.11.4,д).

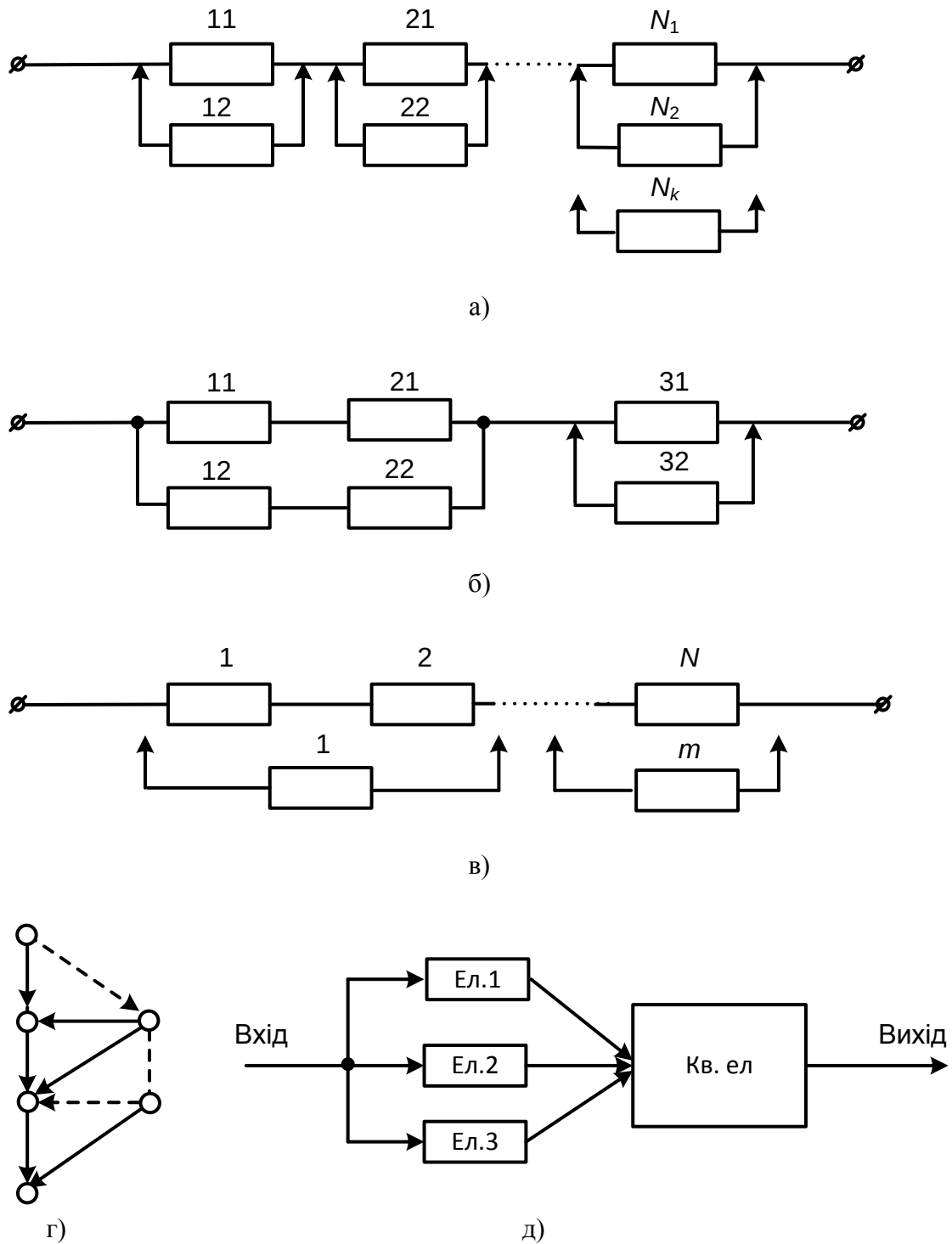


Рис. 3. Логічні схеми надійності при різних способах резервування:
а – по елементне резервування з включенням резерву заміщенням;
б – змішане резервування;
в – ковне резервування з дрібною кратністю;
г – схема вибіркового резервування;
д – схема динамічного резервування.

За схемою вмикання резервних елементів розрізняють: постійне резервування, резервування заміщенням, динамічне резервування та ковне резервування.

Постійне резервування – це паралельне резервування, в якому використовують навантажений резерв. При відмові будь-якого елемента в резервній групі, виконання

об'єктом потрібних функцій забезпечується резервними елементами, що залишилися працездатними, без їх перемикань (рис. 2,а).

Основною перевагою такого способу резервування є його простота та економічність, оскільки, у випадку виходу з ладу робочого (основного) елемента, відпадає необхідність у спеціальних пристроях для ввімкнення резервного елемента.

Недоліком такого резервування є зміна режиму роботи інших працездатних елементів паралельного з'єднання, у випадку відмови одного з них.

Резервування **заміщенням** – це резервування, в якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного (рис. 2,в).

Основним недоліком такого способу резервування є те, що у випадку відмови основного елемента необхідно мати контролюючий та автоматичний пристрій, який би забезпечував виявлення елемента, що відмовив, та підключення резервного.

Динамічне резервування базується на перебудові структури об'єкта у випадку відмови основних елементів. На рис. 3,г основний канал передачі даних позначено суцільною лінією, а можливі резервні тракти – штрих-пунктирною лінією.

Ковзне резервування – це резервування заміщенням (рис. 3,в).

Для практичної реалізації ковзного резервування необхідно мати спеціальний пристрій, що забезпечує виявлення елемента, що відмовив, та автоматичне підключення замість нього резервного елемента.

В залежності від стану, в якому знаходиться резервні елементи до виникнення відмови, тобто до моменту підключення їх в роботу, розрізняють:

- ♦ **навантажений** резерв, коли один або декілька резервних елементів знаходяться в режимі основного елемента.

Недоліком такого резервування є те, що ресурс резерву використовується одночасно з ресурсом основного елемента.

- ♦ **полегшений** резерв, коли один або декілька резервних елементів перебувають у режимі меншого навантаження порівняно з основним елементом. При такому способі резервування ресурс резервного елемента використовується частково.

- ♦ **ненавантажений** резерв, коли один або декілька резервних елементів знаходяться в ненавантаженому режимі до початку виконання функцій основного елемента.

Недоліком такого способу резервування є те, що для його реалізації на практиці необхідно мати спеціальний автоматичний пристрій, який впливає на конструкцію об'єкта.

Пасивним резервуванням називають резервування, при якому відмова одного або декількох елементів пристрою не впливає на його працездатність.

Такий спосіб резервування характеризується тим, що елементи резервованого з'єднання мають постійне паралельне з'єднання. У випадку відмови одного з елементів перебудова схеми не відбувається, на відміну від активного з'єднання.

При пасивному з'єднанні розрізняють:

- ♦ резервування з **незмінним навантаженням**, при якому відмова одного або декількох елементів системи не викликає зміни навантаження на решту елементів;

- ♦ резервування з **перерозподілом навантаження**, при якому відмова одного або декількох елементів системи призводить до того, що навантаження на решту елементів відповідно збільшується.

В залежності від кратності резервування може бути резервування з цілим або дрібним коефіцієнтом кратності. При цьому під кратністю резервування **h** мають на увазі відношення кількості резервних елементів до кількості основних.

Резервування з дрібною кратністю може мати місце, коли два або більше однотипних елемента резервуються одним або більше резервними елементами.

Частіше застосовують варіант з дрібним резервуванням, коли кількість основних елементів більша ніж кількість резервних. Наприклад, у випадку ковзного резервування (рис. 3,в), кратність резервування **h=0,5**.

Резервування, кратність якого дорівнює одиниці, називають дублюванням.

У зв'язку з тим, що структурне резервування пов'язане з додатковими витратами при проектуванні об'єкта (системи), то ці витрати повинні бути виправдані за рахунок

підвищення надійності пристрою та зменшення витрат на ремонтні (відновлювальні) роботи в процесі його експлуатації. Для визначення ефективності резервування використовують наступні якісні показники:

$$B_T = \frac{T_p}{T}; \quad B_p = \frac{P_p(t)}{P(t)}; \quad B_Q = \frac{Q(t)}{Q_p(t)}, \quad (11.1)$$

де B_T – виграш за рахунок підвищення напрацювання на відмову резервованої системи T_p по відношенню до напрацювання на відмову нерезервованої системи T ; B_p та B_Q – аналогічні показники при підвищенні імовірності безвідмовної роботи $P_p(t)$ та зменшення імовірності відмови $Q_p(t)$ резервованої системи.

Резервування вважають ефективним, коли показники B_T , B_p , B_Q більші одиниці.

Надійність систем може бути значно підвищена, якщо в них застосовувати резервування з відновленням, тобто у випадку відмови системи в процесі експлуатації працездатність основної та резервної системи піддається відновленню.

Слід зазначити, що надійність резервованих систем, а також резервованих з відновленням, залежить від надійності вбудованої системи контролю (ВСК), що застосовується для виявлення появи відмови основного елемента та підключення резервного.

При розрахунках надійності резервованих систем надійність ВСК може бути включена в логічну схему послідовно з резервованим з'єднанням елементів.

Застосування того чи іншого способу резервування визначається технічною можливістю реалізації, а точніше вимогами до конструкції та умовами експлуатації.

Як було відзначено раніше, надійність електронних систем значною мірою визначається тим, чи застосовано резервування з відновленням в процесі експлуатації систем, чи без нього. В зв'язку з цим розрізняють:

- ♦ резервування з відновленням, при якому працездатність будь-якого основного і резервного елементів системи у випадку виникнення їх відмов підлягає відновленню;
- ♦ резервування без відновлення, при якому працездатність будь-якого основного і резервного елементів системи у випадку виникнення їх відмов відновленню не підлягає.

Для оцінки надійності резервованих систем існують різні способи та методи розрахунків.

В якості моделей при розрахунках надійності резервованих систем найчастіше використовують логічні схеми надійності та граф станів, за допомогою яких складаються диференціальні рівняння імовірностей станів системи (об'єкта).

Логічною моделлю резервованої системи часто використовують логічну (структурну) схему, на якій елементи мають паралельно-послідовне з'єднання.

У з'єднанні, що складається з послідовно з'єднаних елементів, вихід з ладу одного з них призводить до виходу з ладу всього з'єднання. При з'єднанні елементів паралельно, вихід з ладу одного або декількох елементів не призводить до порушення працездатності з'єднання в цілому. Відмова з'єднання настає лише у випадку виходу з ладу всіх елементів в цьому з'єднанні.

Розглянемо методи розрахунку надійності невідновлюваних в процесі використання об'єктів при різних способах резервування.

Оцінка надійності резервованих систем без відновлення Загальне резервування. Резерв навантажений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічна схема надійності такої системи зображена на рис.11.3,а. Кожна підсистема містить N послідовно з'єднаних елементів.

Імовірність відмови $Q_c(t)$ системи визначається за формулою:

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^{k+1} Q_j(t), \quad (11.2)$$

де $Q_j(t)$ – імовірність відмови на протязі часу t j -ї підсистеми (основної або резервної); $k+1$ – кількість паралельно з'єднаних на логічній схемі підсистем.

Імовірність безвідмовної роботи системи з загальним резервуванням $P_c(t)$ визначається за формулою:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^{k+1} Q_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^{k+1} [1 - \prod_{i=1}^N P_i(t)]. \quad (11.3)$$

Якщо всі $k+1$ підсистем в паралельному з'єднанні мають однакову надійність, то формула (11.3) матиме наступний вигляд:

$$P_c(t) = 1 - [1 - \prod_{i=1}^N P_i(t)]^{k+1}. \quad (11.4)$$

Отримана формула застосовується для визначення надійності технічних систем з загальним резервуванням (резерв навантажений), логічна модель яких відповідає логічній моделі, зображеній на рис. 11.3,а.

Середній наробіток на відмову резервованої системи визначається за формулою:

$$T_{\text{рез}} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt. \quad (11.5)$$

Розглянемо випадок, коли потік відмов елементів в основній та резервній підсистемах являється найпростішим. В цьому випадку середній наробіток на відмову елементів системи відповідає експоненціальному розподілу і імовірність безвідмовної роботи елементів може бути визначена за формулою:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (11.6)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента основної або резервної підсистеми. Підставляючи вираз (11.6) в формулу (11.5), отримуємо:

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t}]^{k+1}. \quad (11.7)$$

Позначивши $\sum_{i=1}^N \lambda_i = \lambda_0$ та підставивши отриманий вираз в (11.7), отримаємо:

$$T_{\text{рез}} = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t})]^{k+1} dt. \quad (11.8)$$

Якщо ввести підстановку $[1 - e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t}] = y$, то вираз (11.8) приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} T_{\text{рез}} &= \frac{1}{\lambda_0} \int_0^{\infty} \frac{1 - y^{k+1}}{1 - y} dy = \frac{1}{\lambda_0} \int_0^{\infty} (1 + y + y^2 + \dots + y^k) dy = \\ &= \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=0}^k \frac{1}{1+j} y^{j+1} \Big|_0^1 = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=0}^k \frac{1}{1+j} = T_0 \sum_{j=0}^k \frac{1}{1+j}, \end{aligned} \quad (11.9)$$

де T_0 – середнє значення наробітку на відмову основної або резервної системи.

З формули (11.10) випливає, що збільшення кратності резервування призводить до зменшення приросту середнього наробітку на відмову. Це пояснюється тим, що при застосуванні навантаженого резерву підсистема постійно витрачає свій технічний ресурс разом з ресурсом основної системи.

Таким чином, чим більша кратність резервування, тим пізніше до роботи підключається резервна підсистема і тим більшу частину ресурсу вона відпрацьовує, коли знаходиться в холостому режимі. В цьому полягає основний недолік навантаженого резерву.

Резерв ненавантажений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічна схема надійності такої схеми зображена на рис. 11.3,в.

При ненавантаженому резерві імовірність безвідмовної роботи системи, яка має одну основну та k резервних підсистем, визначається за рекурсивною формулою:

$$P_c(t) = P_k(t) + \int_0^t P_{k+1}(t-\tau) f_k(\tau) d\tau, \quad (11.10)$$

де $P_k(t)$ – імовірність безвідмовної роботи системи, що має одну основну та $k+1$ резервних підсистем, на протязі часу t ; $P_{k+1}(t-\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи $(k+1)$ -ої резервної підсистеми на протязі часу $(t-\tau)$ при умові, що до моменту часу τ резервна підсистема була працездатна; $f_k(\tau)$ – щільність розподілу наробітку на відмову системи, що має одну основну та $k+1$ резервних підсистем.

У випадку експоненціального розподілу наробітку на відмову елементів системи та резервних підсистем імовірність безвідмовної роботи системи з загальним ненавантаженим резервом визначається за формулою:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!}, \quad (11.11)$$

де $\lambda = \sum_{j=1}^N \lambda_0$ – інтенсивність відмов однієї з $k+1$ паралельно з'єднаних на логічній схемі підсистем;

Формула (11.11) являє собою гамма-розподіл.

Наробіток на відмову системи з ненавантаженим резервом визначається шляхом інтегрування виразу (11.11) в межах $(0, \infty)$:

$$T_{pez} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_0 t} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!} dt = \frac{k+1}{\lambda_0} = T_0(k+1). \quad (11.12)$$

На основі формули (11.12) можна зробити висновок, що наробіток на відмову системи з ненавантаженим резервом завжди більший ніж при навантаженому.

Однак, слід зазначити, що на практиці реалізувати ненавантажений резерв в електронній апаратурі не завжди є можливим, оскільки значна її частина використовується в різних об'єктах (автомобільний та залізничний транспорт, кораблі, літаки і інші), де на неї діють різні механічні та кліматичні фактори. Ці дії, навіть при відсутності електричного навантаження в резерві, призводять до швидкого вичерпання технічного ресурсу внаслідок старіння елементів.

Крім того, для окремих видів систем при експлуатації перерви в роботі неприпустимі, тому в таких системах застосовують полегшений резерв.

Резерв полегшений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічна схема надійності такої системи зображена на рис. 11.3,в.

При полегшеному резерві імовірність безвідмовної роботи системи, що має одну основну та k резервних підсистем, визначають за формулою:

$$P_c(t) = P_k(t) + \int_0^t P_{k+1}(\tau) P_{k+1}(t-\tau) f_k(\tau) d\tau, \quad (11.13)$$

де $P_k(t)$ – імовірність безвідмовної роботи k -ї системи, що має одну основну та $k-1$ резервних підсистем, на протязі часу t ; $P_{k+1}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи $(k+1)$ -ї резервної підсистеми до моменту часу τ ввімкнення її до роботи; $P_{k+1}(t-\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи $(k+1)$ -ї резервної підсистеми на протязі часу $(t-\tau)$ від моменту τ , коли її було включено в роботу, до моменту часу; $f_k(t)$ – щільність розподілу напрацювання на відмову системи, що має одну основну та $(k-1)$ резервних підсистем.

У випадку основної та резервної підсистем, які мають рівну надійність, та експоненціальний розподіл наробітку на відмову елементів, імовірність безвідмовної роботи системи з загальним полегшеним резервом визначається за формулою:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \sum_{j=1}^k \frac{a_j}{j!} (1 - e^{-\lambda_1 t}) \right], \quad (11.14)$$

де λ та λ_0 – інтенсивності відмов основної та резервної підсистем в робочому та полегшеному станах відповідно;

$$a_j = \prod_{i=0}^{j-1} \left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right). \quad (11.15)$$

Середній наробіток на відмову системи з полегшеним резервуванням визначається за формулою:

$$T_{pez} = \int_0^\infty P_c(t) dt = T_0 \sum_{j=0}^k \frac{1}{1 + j K_p}, \quad (11.16)$$

де $K_p = \lambda_1 / \lambda_0$ – коефіцієнт використання ресурсу.

Роздільне резервування.

Резерв навантажений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічна схема надійності системи з роздільним резервуванням зображена на рис. 11.3,б.

При роздільному резервуванні імовірність безвідмовної роботи системи з навантаженим резервуванням на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (11.17)$$

де $P_i(t)$ – імовірність безвідмовної роботи i -го елемента (ділянки резервування); k_i+1 – кількість з'єднаних паралельно на логічній схемі елементів на i -й ділянці резервування.

У випадку, коли елементи (основний та резервні) мають однакову надійність та експоненціальний розподіл наробітку на відмову, імовірність безвідмовної роботи системи з роздільним резервуванням визначається за формулою:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N [1 - (1 - e^{-\lambda_i t})^{k_i+1}], \quad (11.18)$$

Середній наробіток на відмову системи з роздільним резервуванням:

$$T_{\text{рез}} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \frac{(N-1)!}{\lambda(k+1)} \sum_{\eta=0}^k \frac{1}{\frac{\eta+1}{k+1} (\frac{\eta+1}{k+1} + 1) \dots (\frac{\eta+1}{k+1} + N-1)},$$

де $\lambda = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{N}$ – середнє значення інтенсивності відмов елементів.

Резерв ненавантажений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічна схема надійності такої системи зображена на рис. 11.4,а.

Імовірність безвідмовної роботи системи з роздільним резервуванням на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[\sum_{j=1}^k \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!} \right]^N, \quad (11.19)$$

де λ_0 – інтенсивність відмов основного елемента;

$\lambda = \sum_{i=0}^N \frac{\lambda_i}{N}$ – середнє значення інтенсивності відмов елементів.

Середній наробіток на відмову резервованої системи:

$$T_{\text{рез}} = \int_0^{\infty} P_{\text{розд}}(t) dt = T_0 \sum_{i=0}^N C_N^i \frac{i!}{N^i}, \quad (11.20)$$

де $C_N^i = \frac{N!}{(N-i)!i!}$ – кількість сполучень з N по i .

Активне резервування з урахуванням надійності перемикачів

Логічну схему такої системи зображено на рис. 11.5.

При загальному резервуванні (резерв навантажений) імовірність безвідмовної роботи системи на протязі t часу визначають за формулою:

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^{k+1} [1 - P_{\pi_j}(t)P_j(t)], \quad (11.21)$$

де $P_j(t)$ – імовірність безвідмовної роботи основного або резервних елементів на протязі часу t ; $P_{\pi_j}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи перемикача на протязі часу t .

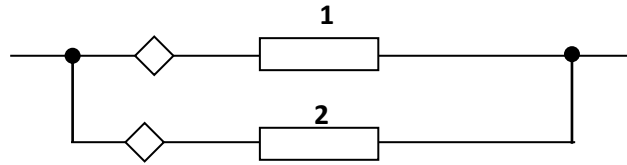


Рис. 11.5.Схема резервування з перемикачами **П**

При роздільному резервуванні (резерв навантажений) імовірність безвідмовної роботи системи визначається за формулою:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N \{1 - \prod_{j=1}^{k+1} [1 - P_{\pi_{ji}}(t)P_{ji}(t)]\}. \quad (11.22)$$

Ковзне резервування.

Резерв навантажений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічну схему надійності для такої системи зображено на рис. 11.4,в.

Система складається з N основних та k резервних елементів. Будь-який з резервних елементів може замінити будь-який основний елемент, що відмовив. Відмова системи в цілому відбувається лише за умови, що кількість основних елементів, що вийшли з ладу, перевищує кількість резервних елементів.

Оскільки кількість основних елементів, звичайно, більша ніж резервних, то такий вид резервування називають ковзним з дрібною кратністю. Як приклад такого резервування можна навести один резервний комплект апаратури передачі даних на чотири основних.

Вважатимемо, що потоки відмов основних та резервних елементів, найпростіші.

В такому випадку імовірність безвідмовної роботи системи на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = \sum_{i=N}^{N+k} C_{N+k}^i e^{-i\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{N+k-i}, \quad (11.23)$$

де λ – інтенсивність відмов основних та резервних елементів.

Середній наробіток на відмову системи

$$T_{\text{pez}} = \sum_{i=N}^{N+k} \frac{1}{i\lambda}. \quad (11.24)$$

Резерв ненавантажений

Основний та резервні елементи системи однакової надійності.

Як приклад такої системи розглянемо систему, що складається з N основних та одного резервного елементів. Така система буде безвідмовно працювати на протязі часу t за наступних несумісних подій.

- ♦ усі елементи основної системи працюють безвідмовно на протязі часу t ;
- ♦ відмовив один основний елемент з кількості $N+1$ основних та резервних елементів в момент часу $\tau < t$,
- ♦ працездатний резервний елемент ввімкнувся в роботу і безвідмовно працював решту часу на інтервалі $(t-\tau)$.

Складаючи імовірності цих подій, отримаємо вираз для обчислення імовірності безвідмовної роботи системи з ковзним резервом:

$$P_c(t) = P^{N-1}(t)[P(t) + N \int_0^t P_n(\tau)P(t-\tau)f(\tau)d\tau], \quad (11.25)$$

де $P(t)$ – імовірність безвідмовної роботи одного елемента основної системи на протязі часу t ; $P_n(t)$ – імовірність безвідмовної роботи перемикачів до моменту τ ввімкнення резервного елемента; $P(t-\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи резервного елемента з моменту τ ввімкнення його в роботу до моменту t ; $f(\tau)$ – щільність розподілу наробітку на відмову одного робочого елемента основної системи.

У випадку експоненціального розподілу наробітку на відмову основних та резервного елементів та перемикача (потіки відмов найпростіші) імовірність безвідмовної роботи системи на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = e^{-N\lambda t} [1 + N \frac{\lambda}{\lambda_n} (1 - e^{-\lambda_n t})], \quad (11.26)$$

де λ та λ_n інтенсивність відмов основного, що працює, елемента та перемикачів відповідно.

У випадку, коли N основних та k резервних елементів мають однакову надійність та абсолютно надійного перемикача, імовірність безвідмовної роботи резервованої системи на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = e^{-N\lambda t} \sum_{j=0}^k \frac{(N\lambda t)^j}{j!}. \quad (11.27)$$

Середній наробіток на відмову резервованої системи визначається за формулою:

$$T_{рез} = \frac{K+1}{N\lambda}. \quad (11.28)$$

Резерв полегшений

Основний та резервні елементи системи однакової надійності, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Розглянемо випадок, коли система складається з N основних та k резервних елементів. Потіки відмов основних та резервних елементів є найпростіші.

Для даного випадку імовірність безвідмовної роботи системи на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = \frac{\prod_{j=0}^k (N+j \frac{\lambda_i}{\lambda_0})}{(\frac{\lambda_i}{\lambda_0})^k k!} - \sum_{j=0}^k \frac{(-1)^j C_k^j}{N+j \frac{\lambda_i}{\lambda_0}} e^{-(N+j \frac{\lambda_i}{\lambda_0})\lambda t}, \quad (11.29)$$

де λ_0 та λ_1 – інтенсивність відмов елементів в робочому (основному) та полегшеному режимах відповідно.

Середній наробіток на відмову резервованої системи

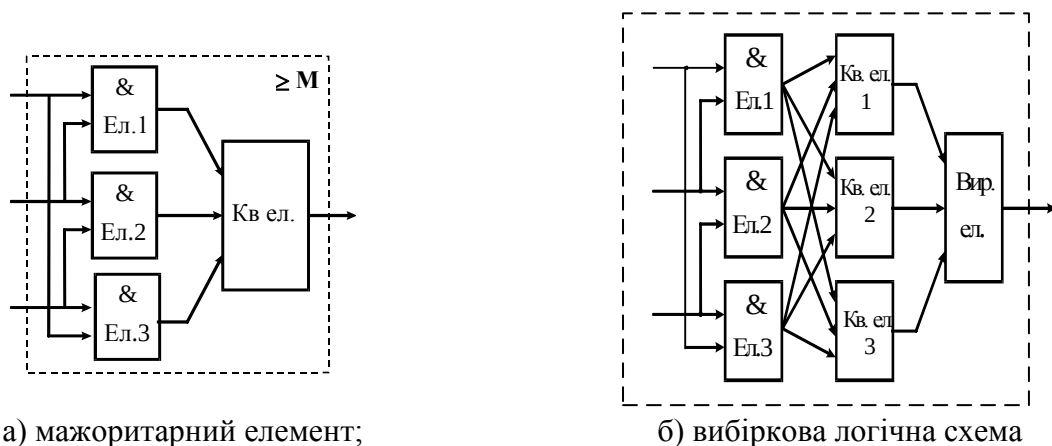
$$T_{\text{рез}} = T_0 \sum_{j=0}^k \frac{1}{N + j \frac{\lambda_1}{\lambda_0}}. \quad (11.30)$$

Резервування з використанням вибірових схем

Основними недоліками структурного резервування заміщенням є його технічна складність реалізації та недостатня надійність перемикачів.

Стосовно застосування постійного (навантаженого) резервування, то воно також має ряд недоліків. Наприклад, у випадку резервування на рівні елементів, необхідно мати елементи з підвищеною навантажувальною здатністю, оскільки у випадку відмови робочого елемента значно змінюється режим роботи решти елементів, що залишились працездатними, а відповідно і їх надійність. Резервування з використанням вибірових схем, які працюють за принципом голосування за більшістю, є одним з різновидів структурного резервування. Такий вид резервування застосовується в інформаційних системах з навантаженим резервом.

Способи такого резервування наведено на рис. 11.6.



а) мажоритарний елемент;
Рис. 11.6. Структурна схема резервування з використанням вибірових логічних схем

При резервуванні з використанням вибірових схем вхідний сигнал в двійковому коді (“0” або “1”) подається на вхід непарної кількості ідентичних елементів, які підключені паралельно. З виходів цих елементів сигнали поступають на кворум-елемент (вирішальний елемент), де вони порівнюються.

Кворум-елемент формує на своєму виході сигнал (“0” або “1”) в тому випадку, коли на його входи поступають аналогічні сигнали від більшості ідентичних елементів. Тому такий спосіб резервування іноді називають мажоритарним, а вирішальний елемент, що реалізує мажоритарний закон (голосування за більшістю), мажоритарним.

Найбільш широке застосування використання в інформаційних системах знайшли мажоритарні елементи на логічних елементах “І” та “АБО”, що реалізують операцію “2 з 3”.

Структурну схему найпростішого мажоритарного елемента зображено на рис. 5,а.

Імовірність безвідмовної роботи на протязі часу t схеми (мажоритарного елемента) визначається наступним чином.

Для цього введемо наступні позначення: $P_1(t)$, ..., $P_3(t)$ та $P_v(t)$ – імовірність безвідмовної роботи схеми на протязі часу t ідентичних та вирішального елементів.

Розглянемо всі можливі стани системи, в яких вона може знаходитись у випадку виходу з ладу елементів. Позначимо працездатні та непрацездатні стани елементів символами “1” та “0” відповідно.

Дані можливих станів системи наведено в табл.11.1.

Таблиця 11.1 - Дані можливих станів системи

$p_1(t)$	$p_2(t)$	$p_3(t)$	$p_v(t)$	$p_1(t)$	$p_2(t)$	$p_3(t)$	$p_v(t)$
1	1	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	0	1	0	0
1	0	1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0	0	1

Припустимо, що вирішальний елемент абсолютно надійний, тобто $p_v(t)=1$. Тоді у відповідності з даними станів (див. табл.11.1), в яких схема зберігає свою працездатність, імовірність безвідмовної роботи мажоритарного елемента $P_m(t)$ на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_m(t) = p_1(t)p_2(t)p_3(t) + q_1(t)p_2(t)p_3(t) + p_1(t)q_2(t)p_3(t) + p_1(t)p_2(t)q_3(t), \quad (11.31)$$

де $q_1(t), \dots, q_3(t)$ – імовірність відмов ідентичних елементів на протязі часу t .

Якщо припустити, що $P_1(t) = P_2(t) = P_3(t) = P(t)$ в силу їх ідентичності, то вираз (11.31) приймає наступний вигляд:

$$P_m(t) = p^2(t)[3 - p(t)]. \quad (11.32)$$

У випадку, коли вирішальний елемент не є абсолютно надійним, тобто $p_v(t) \neq 1$, то вираз (11.32) буде мати вигляд:

$$P_m(t) = p_v(t)p^2(t)[3 - 2p(t)], \quad (11.33)$$

Слід пам'ятати, що головною умовою використання мажоритарного резервування повинна бути ідентичність логічних елементів. Якщо логічні елементи не ідентичні, то мажоритарний закон застосовувати неможливо.

Визначення надійності резервованих систем при двох видах відмов

Однією з причин, що призводить до відмови технічних систем в процесі експлуатації, є вихід з ладу елементів систем. Аналіз елементів, що вийшли з ладу показує, що в більшості випадків порушення працездатності цих елементів трапляється внаслідок короткого замикання чи обриву елементів.

Іноді відмови технічних пристроїв викликаються відхиленням параметрів елементів за допустимі границі. В якості прикладу можна навести випадок, коли зміна номіналу ємності височастотних конденсаторів за границі допуску викликає розлад вибіркокових схем фільтрів. Їх називають параметричними відмовами.

Зовнішній прояв відмов елементів типу обрив і коротке замикання можемо спостерігати в напівпровідникових діодах, конденсаторах, ІМС, релейно-контактних елементах та елементах інших типів.

На рис.11.7 зображена логічна схема надійності елемента з урахуванням можливого обриву та короткого замикання.

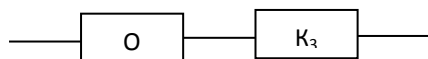


Рис.11.7. Логічна схема надійності елемента

Введемо наступні позначення. Нехай ймовірність безвідмовної роботи елементу відносно обриву $P_0(t)$, а ймовірність безвідмовної роботи елемента відносно короткого замикання $P_3(t)$. Тоді ймовірність будь-якого елементу за заданий час визначається добутком:

$$P(t) = P_0(t)P_3(t). \quad (11.35)$$

У випадку резервованих елементів ймовірність безвідмовної роботи таких елементів потрібно розглядати з урахуванням ймовірностей безвідмовної роботи при цих двох видах відмов.

Очевидно, що співвідношення цих ймовірностей залежить від типу елементів.

Розглянемо визначення надійності резервованих систем при двох видах відмов. Для цього в якості прикладу розглянемо систему, яка складається з двох паралельно з'єднаних діодів (рис. 11.8,а).

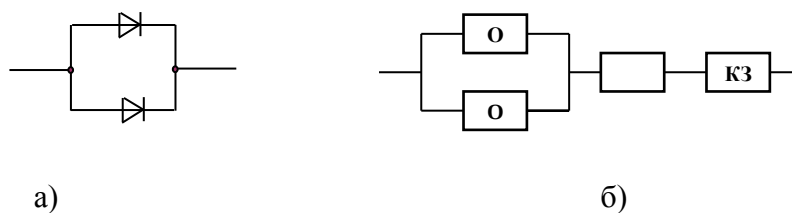


Рис.11.8

а) схема електрична паралельного з'єднання діодів;
б) логічна схема надійності діодів

Якщо можливі відмови у вигляді обриву і короткого замикання, то надійність резервованої системи може бути визначена наступним чином.

Розглянемо можливі наслідки, які можуть відбуватися в дубльованій системі у випадку виникнення того чи іншого виду відмов. Так, коротке замикання будь-якого з діодів призводить до відмови даної системи в цілому, а обрив будь-якого з діодів - до відмови лише цього елемента. В цьому випадку логічна схема надійності дубльованої системи має вигляд, зображений на рис.11.8,б.

Ймовірність безвідмовної роботи дубльованої системи (рис.11.8,а) з урахуванням логічної схеми надійності (рис.11.8,б) визначається виразом:

$$P(t) = \{1 - [1 - P_0(t)]^2\} P_3^2(t).$$

Якщо діоди з'єднані послідовно (рис. 11.9,а), то логічна схема надійності в цьому випадку має вигляд, зображений на рис.11.9,б.

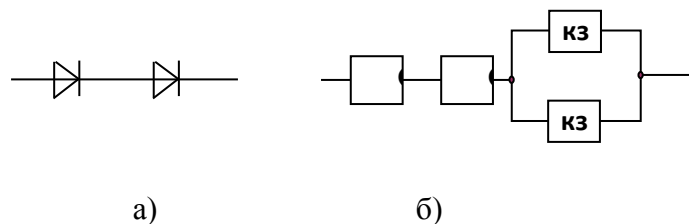


Рис.11.9.

а) схема електрична послідовного з'єднання діодів;
б) логічна схема надійності

Імовірність безвідмовної роботи системи (рис.11.9,а) з урахуванням логічної схеми надійності (рис.11.9,б) визначається виразом:

$$P(t) = P_0^2(t) \{1 - [1 - P_3(t)]^2\}. \quad (11.36)$$

При паралельному з'єднанні m елементів коротке замикання будь-якого з елементів призводить до відмови всієї системи, а при обриві - система зберігає свою працездатність.

У цьому випадку імовірність безвідмовної роботи резервованих систем з однаковою надійністю елементів з урахуванням двох видів відмов визначається за формулою:

$$P(t) = \{1 - [1 - P_0(t)]^m\} P_3^m(t). \quad (11.37)$$

Якщо при резервуванні використовується послідовне з'єднання m елементів, то обрив будь-якого з елементів призводить до відмови всього з'єднання, а при короткому замиканні - з'єднання зберігає свою працездатність.

В цьому випадку надійність резервованої системи з послідовним з'єднанням елементів з однаковою надійністю визначається за формулою:

$$P(t) = P_0^m(t) \{1 - [1 - P_3(t)]^m\}. \quad (11.38)$$

У загальному випадку, коли значення імовірності $P_0(t)$ і $P_3(t)$ для окремих елементів різні, то надійність системи з m послідовно з'єднаних елементів визначається за формулою:

$$P(t) = \prod_{i=1}^m P_{0i}(t) \{1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_{3i}(t)]\}. \quad (11.39)$$