МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КАФЕДРА ПРОГРАМНИХ І КОМП’ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ З ДИСЦИПЛІНИ

Надійністні характеристики обладняння

(Теоретична частина)

Для студентів інституту штучного інтелекту та робототехніки

Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма: Комп'ютерні технології автоматизації.

Одеса 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КАФЕДРА ПРОГРАМНИХ І КОМП’ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ З ДИСЦИПЛІНИ

Надійністні характеристики обладняння

(Теоретична частина)

Для студентів інституту штучного інтелекту та робототехніки

Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма: Комп'ютерні технології автоматизації.

Затверджено на засіданні

кафедри програмних і комп’ютерно-інтегрованих технологій

Протокол № 7 від 26.01.2022 р.

Одеса 2022

Методичні вказівки з дисципліни Надійністні характеристики обладняння. (Теретична частина): для студ. напряму 151 «Автоматизацiя та комп’ютерно-iнтегрованi технологiї» денної та заочної форм навчань./ Укл. Брунеткін О.І. – Одеса: ОП, 2022. – 128 с.

Зміст

[Лекція 1. ПОНЯТТЯ НАДІЙНОСТІ 5](#_Toc93509649)

[Лекція 2. ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ 10](#_Toc93509650)

[Лекція 3. ЕКСПОНЕНЦІЙНИЙ ЗАКОН РАПТОВИХ ВІДМОВ 13](#_Toc93509651)

[Лекція 4. ВИСНОВОК ЗАГАЛЬНОЇ ФОРМУЛИ ДЛЯ ФУНКЦІЇ НАДІЙНОСТІ 17](#_Toc93509652)

[Лекція 5. ПЕРІОД НОРМАЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ 22](#_Toc93509653)

[Лекція 6. ЗНОС ТА НАДІЙНІСТЬ 25](#_Toc93509654)

[Лекція 7. СПІЛЬНА ДІЯ РАПЛИВНИХ І ЗНОСОВИХ ВІДМОВ 31](#_Toc93509655)

[Лекція 8. ПРИРОБНІ ВІДМОВИ І ДОВГОВІЧНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ 33](#_Toc93509656)

[Лекція 9. ЕКСПОНЕНЦІЙНЕ І ПУАССОНІВСЬКЕ РОЗПОДІЛУ 36](#_Toc93509657)

[Лекція 10. НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ НАСЛІДНО СПОЛУЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ 40](#_Toc93509658)

[Лекція 11. НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ ПРИ ПОСТОЯНОМУ РЕЗЕРВУВАННІ (НАГРУДЖЕНИЙ РЕЗЕРВ) 43](#_Toc93509659)

[Лекція 12. НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМИ ПРИ НЕНАВАНТАЖЕНОМУ РЕЗЕРВІ 45](#_Toc93509660)

[Лекція 13. ФОРМУЛА БАЙЄСА В ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ 48](#_Toc93509661)

[Лекція 14. ВИДИ ВІДМОВИВ ЕЛЕМЕНТІВ І НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМИ 53](#_Toc93509662)

[Лекція 15. ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РІВНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ 61](#_Toc93509663)

[Лекція 16. КОЕФІЦІЄНТ ГОТОВНОСТІ З ОБЛІКОМ І БЕЗ ОБЛІКУ ПРОФІЛАКТИКИ 70](#_Toc93509664)

[Лекція 17. ОБЛІК НАДІЙНОСТІ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ 78](#_Toc93509665)

[Лекція 18. ПРИКЛАДИ АНАЛІЗУ КОНСТРУКЦІЙ 84](#_Toc93509666)

[Лекція 19. ПРОФІЛАКТИЧНІ ОГЛЯДИ І ЗАМІНА ДЕТАЛІВ 93](#_Toc93509667)

[Лекція 20. ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ 104](#_Toc93509668)

[Лекція 21. ДОВІРНІ ІНТЕРВАЛИ 116](#_Toc93509669)

[Лекція 22. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ 122](#_Toc93509670)

[Список літератури 127](#_Toc93509671)

Проблема надійності та довговічності сучасних технічних пристроїв має першорядне значення для техніки загалом і, зокрема, для комплексної автоматизації виробництва, удосконалення управління та зв'язку.

Метою курсу є ознайомлення студентів з необхідними поняттями та методами у їхній логічній послідовності, від простих елементів до складних систем, щоб дати ясне розуміння предмета та показати, як вирішувати проблеми надійності при аналізі, проектуванні та випробуваннях. Через недостатню надійність витрачаються значні кошти і гальмується технічний прогрес у багатьох життєво важливих галузях. Надійність - це цікава і перспективна область, яка, будучи добре зрозуміла, допомагає скоротити непродуктивні витрати матеріалів, часу та засобів.

Надійність тісно пов'язана з ремонтопридатністю, готовністю та безпекою системи. Тому до курсу лекцій включено кількісний розгляд цих понять та в загальних рисах описані методи, якими в цій галузі можна керуватися.

# Лекція 1. ПОНЯТТЯ НАДІЙНОСТІ

Що таке надійність? У словниках та енциклопедіях можна знайти різні тлумачення цього слова, що відноситься до категорії таких абстрактних понять, як краса, добро чи чесність. Абстрактні поняття для різних людей мають різний зміст та важко піддаються визначенню. Те, що здається прекрасним одній людині, іншій може здатися потворним. Поняття, які важко визначити, ще складніше виміряти.

Однак у техніці та математичній статистиці надійність має цілком точне значення. Вона не тільки може бути точно визначена, але й розрахована, об'єктивно оцінена, виміряна, випробувана та навіть розподілена між окремими частинами апаратури. Таким чином, надійність не абстракція, а щось, що належить суворій дійсності. Надійність має таке ж значення, як робочі характеристики об'єкта, а дуже часто вона навіть важливіша за ці характеристики.

Нехай є реактивний двигун, розрахований створення певної тяги, йди якесь електронне устаткування. Якщо трапиться, що під час роботи створювані ними тяга або величина керуючого впливу будуть меншими від передбачених технічними Умовами, то така робота, хоча вона і не є найкращою, в певних умовах все ж таки може бути задовільною і двигун або електронне обладнання можуть виявитися цілком надійними. З іншого боку, двигун будь-якої іншої конструкції, який легко розвиває повну тягу, що відповідає технічним умовам, може раптово відмовити у роботі. Тут ми зустрічаємося з поняттям надійності.

Відмови обладнання можуть перетворитися на кошмар для інженера, який займається проектуванням, виробництвом, обслуговуванням або експлуатацією. Але надійність зачіпає не тільки інженера та виробника, часто вона найбільше позначається на споживачі. Ціна ненадійності дуже висока.

З проблемами надійності людині довелося зіштовхнутися від початку промислового століття. Спочатку дослідження надійності обмежувалися областю механічного устаткування. Нова ера у проблемі надійності почалася з появою та розвитком електроніки, реактивної авіації звукових та надзвукових швидкостей, космічних кораблів. Спочатку проблема надійності вирішувалася шляхом використання високих запасів міцності, що призводило до величезного збільшення ваги обладнання, або шляхом широкого застосування резервування, що знову-таки призводило до збільшення загальної ваги, або, нарешті, вивченням відмов і несправностей попередніх конструкцій при розробці нової апаратури, заснованої на подібних принципах. Проте для нових типів розроблюваного устаткування такий підхід виявився неприйнятним. Одночасно зі стрімким розвитком техніки та засобів сучасної електроніки зростали вимоги суттєвого зменшення ваги та габаритів апаратури. Час випереджає тих, хто хоче почекати, щоб повчитися на помилках минулих конструкцій. Наступні конструкції повинні суттєво відрізнятися від попередніх. Темпи розвитку зростають і продовжуватимуть зростати. Звідси випливає, що проблема підвищення надійності стає все більш гострою, інтуїтивний та емпіричний підходи змушені поступитися дорогою підходу, при якому визначення, оцінки та розрахунки надійності базуються на статистичних методах.

Таким чином, інженери, які хочуть йти в ногу з розвитком техніки та виробництва, повинні добре засвоїти поняття «надійність» та застосовувати у своїй повсякденній роботі відповідні методи.

Найбільш коротко надійність можна визначити як здатність апаратури не відмовляти у роботі. Якщо апаратура працює добре і завжди готова виконувати ті функції, для яких призначена, то таку апаратуру називають надійною. Задовільна робота апаратури без відмов при її експлуатації та готовність до роботи у потрібний час є критеріями надійності. Апаратура може складатися з простого пристрою, але може бути дуже складною системою. Надійність складного обладнання залежить від його надійності елементів. Існує точний математичний зв'язок між надійністю найскладнішої системи та надійністю її елементів.

Мірою надійності обладнання є інтенсивність відмов. Якщо відмови відсутні, обладнання має стовідсоткову надійність, якщо інтенсивність відмов мала, надійність обладнання зазвичай ще прийнятна. Але якщо інтенсивність відмов висока — обладнання ненадійне.

Добре спроектована, добре виготовлена, детально випробувана та правильно експлуатована апаратура не повинна відмовляти у роботі. Однак досвід показує, що навіть найкращі конструкції, досконала технологія виготовлення та правильна експлуатація не виключають виникнення відмов. Теорія надійності розрізняє три характерні типи відмов (виключаючи пошкодження, заподіяні недбалим зверненням і зберіганням або неправильною експлуатацією), які можуть бути внутрішньо присушені апаратури і виявлятися без будь-якої провини з боку обслуговуючого персоналу.

По-перше, є відмови, які відбуваються протягом раннього періоду експлуатації елемента. Вони називаються приробітковими відмовими і в більшості випадків відбуваються внаслідок поганої технології виробництва та поганого контролю якості виробів при їх виготовленні. Декілька дефектних зразків серед великої кількості хороших деталей можуть залишитися непоміченими. Під час складання апаратури може бути непоміченим погане з'єднання елементів. Подібні похибки не викликають занепокоєння, і відмови, яких вони неминуче призводять, трапляються зазвичай протягом перших хвилин або годин роботи. Ранні відмови можуть бути виключені так званими процесами «відбраковування» та «приробітку». Процес опрацювання полягає в тому, що апаратуру протягом декількох годин змушують працювати в умовах, близьких до умов експлуатації. Дефектні, нестандартні елементи, що відмовляють протягом перших годин роботи апаратури, замінюють хорошими елементами. Процес відбраковування полягає в тому, що велика кількість елементів протягом декількох годин змушують працювати в умовах, близьких до реальних, після чого елементи, що витримали це випробування, використовуються при складанні виробів.

По-друге, існують відмови, які викликаються зносом окремих елементів. Вони виникають у виробах, які неправильно обслуговуються або не обслуговуються. Відмови з допомогою зносу є ознакою старіння елементів. Період зношування елементів коливається від декількох хвилин до декількох років. Найчастіше відмови з допомогою зносу може бути запобігти. Наприклад, для багаторазово використовуваної апаратури одним з можливих методів є заміна через певний час доступних елементів, які схильні до зносу, причому інтервал часу між замінами повинен бути коротшим за середній період зносу елемента. Якщо доступ до деяких елементів утруднений, вони розраховуються на більш тривалий термін служби, ніж передбачуваний період роботи виробу. Цей метод застосовується і до апаратури «одноразового» використання, такої як керовані снаряди, які застосовуються тільки одноразово.

По-третє, існують так звані раптові відмови, які не можуть бути усунені ні при налагодженні обладнання, ні найкращим її обслуговуванням. Такі відмови виникають внаслідок раптової концентрації навантажень, що перевищує розрахункове навантаження. Раптові відмови виникають випадково, несподівано; ніхто не може передбачити, коли вони відбудуться. Однак такі раптові відмови все ж таки підкоряються певним загальним закономірностям, так що частота відмов протягом досить великого періоду приблизно постійна. Раптові відмови називають іноді «катастрофічними», проте ця назва неточна, тому що приробіткові та зносові відмови можуть бути настільки ж «катастрофічними» за своїми наслідками, а раптові відмови не обов'язково повинні бути «катастрофічні» для апаратури, в якій вони відбуваються.

Виключити раптові відмови нелегко. Однак розроблені методи підвищення надійності, що дозволяють зменшити ймовірність виникнення раптових відмов, зводячи до мінімуму їх кількість за певний інтервал часу.

Класифікація відмов на приробіткові, зносові та раптові проводиться за двома основними ознаками. По-перше, кожен із цих типів відмов характеризується своїм особливим статистичним розподілом і тому потребує різної математичної обробки. По-друге, для усунення кожного типу відмов слід застосовувати різні методи.

Безвідмовна робота деяких видів устаткування необхідна як з метою промисловості, але й збереження життя. Таке обладнання має бути надійним. У подібному обладнанні приробіткові відмови слід усувати шляхом тривалих випробувань, що передують введенню в експлуатацію. Зносові відмови повинні бути усунені правильним режимом роботи, гарною профілактикою. Якщо після цього в процесі роботи обладнання все ще відбуваються відмови, то вони, напевно, мають раптовий характер. Отже, характеристика надійності такого обладнання визначається частотою появи раптових відмов.

Програма забезпечення надійності полягає у виключенні спочатку приробіткових відмов за допомогою спостереження їх розподілу та визначення відповідно до цього необхідної тривалості періоду припрацювання та наступних заходів доведення апаратури. Подальшим завданням є попередження зносових відмов шляхом спостереження їхнього розподілу, визначення міжремонтних термінів та термінів профілактичної заміни різних деталей. Нарешті, головна увага має бути звернена на раптові відмови: з їхньої попередження, зменшення чи повне усунення, оскільки саме раптовий відмова найбільш згубно б'є по надійності апаратури під час її основний роботи — у період після налагодження і перед початком зносу її частин. Для апаратури з великим терміном служби цей час відповідає періоду між ремонтами.

На жаль, часто навіть усіх докладених зусиль виявляється недостатньо для повного виключення приробіткових та попередження зносових відмов. Приробітні відмови можуть вкрастися в апаратуру при кожному огляді або ремонті в результаті неправильного вибору деталей для заміни елементів, що відмовили або наближалися до стану зносу, внаслідок помилок монтажу або в результаті незадовільного налагодження системи, що проводиться при ремонті. Такий ремонт може призвести до відмов у роботі протягом усього часу функціонування. Система або апаратура при цьому ніколи не буде надійною, хоча при хорошому ремонті і при врахуванні тільки раптових відмов вона могла б бути дуже надійним технічним пристроєм. Подібним чином зносові відмови можуть, по суті, дуже надійну апаратуру перетворити на вкрай неналежну. Однак така ненадійність є, як правило, наслідком недбалості обслуговуючого персоналу (наприклад, недотримання ним правил експлуатації), а саме обладнання тут ні до чого.

*Надійність* - це міра можливості апаратури працювати безвідмовно, коли вона перебуває в експлуатації. Кількісно надійність виявляється ймовірністю безвідмовної роботи апаратури протягом даного періоду часу в розрахункових умовах експлуатації. Цим періодом може бути заданий час виконання одиничної операції чи певної кількості послідовних операцій чи завдань. Поняттям, протилежним до надійності, є поняття *ненадійності*, яке визначається як ймовірність відмови протягом заданого часу роботи.

Слово *ймовірність* іноді сприймається скептично, особливо у техніці. Дійсно, далеко не кожному очевидно, що робити з математичним поняттям ймовірності при проектуванні чи експлуатації технічного обладнання. Навіть якщо його вдасться використати для деяких розрахунків, то як можна довіряти результату такого підходу, коли фізика та техніка є такими точними науками? Однак такий висновок був би великою помилкою. Більш глибоке ознайомлення з фізикою показує, що значна кількість фізичних явищ може бути точно описана тільки за допомогою теорії ймовірностей і що ймовірні розрахунки мають високий рівень достовірності. Існують дуже важливі області у фізиці, особливо в молекулярній, атомній та ядерній, де основні поняття можуть бути сформульовані математично лише за допомогою теорії ймовірностей та математичної статистики.

Звичайно, кожен має право сумніватися в тому, наскільки точні ймовірні розрахунки. Чи можуть вони дати відповіді досить близькі до істинних? Такий простий приклад, як кидання монети, дуже показовий у цьому плані. Імовірність випадання герба при киданні симетричної монети дорівнює 1/2 чи 50%. Імовірність випадання цифри («решітки») також дорівнює 1/2. Тому можливість випадання або герба, або цифри при одному киданні дорівнює 1/2+1/2=1, або 100%. Стовідсоткова ймовірність відповідає у разі достовірному події. Якщо ймовірність випадання чи цифри, чи герба при одиничному випробуванні дорівнює одиниці, то ймовірність того, що не випаде ні цифра, ні герб, має дорівнювати нулю. При цьому ми не враховуємо, зрозуміло, падіння монети на ребро. Допускається лише два результати випробування: герб або цифра. Це, однак, цілком реальне припущення, і тому воно допустиме. Подібне припущення про два взаємно виключають один одного результати (герб або цифра) дуже часто зустрічається в теорії надійності, коли не беруться до уваги можливості інших результатів.

Використовуючи приклад з монетою, зауважимо далі, що коли монета кидається кілька разів, ймовірність випадання герба при кожному випробуванні дорівнює 1/2 незалежно від того, скільки разів вже була кинута монета. Тому найімовірніше було б очікувати, що при 10-кратному повторенні випробування монета 5 разів випаде гербом і 5 разів цифрою. Тим не менш, досить малоймовірно, що ми отримаємо цей результат при одній серії з 10 випробувань. Такий експеримент може дати результат: 3 рази герб та 7 разів цифра або будь-який інший результат. І все ж таки було б невірно робити з цього висновок, що ймовірність випадання герба в одному досвіді не дорівнює 1/2. Неправильним було б і на підставі перших 10 дослідів зробити висновок про те, що ймовірність випадання герба дорівнює 3/1 тільки тому, що в 10 випробуваннях 3 рази випав герб.

Тепер ми підійшли до питання, дуже важливого у проблемі надійності, особливо при випробуваннях на надійність. Якщо досвід з монетою повторюється знову і знову і результати серій кожних наступних 10 кидків складаються, то чим більше дослідів, тим точніше ми наближаємося до значення ймовірності, що дорівнює 1/2. Наприклад, серед 100 випробувань може випасти 42 рази герб та 58 разів цифра. Тоді ми могли б укласти, що можливість випадання герба дорівнює 42/100= 0.42. Цей результат вже ближчий до 1/2, ніж 0.3. Якби той самий експеримент повторювався сотні разів, ми ще більше наблизилися б до 1/2. Кажуть, що величина 1/2 є *справжньою ймовірністю*, або *ймовірністю*. А результат, отриманий з обмеженого числа дослідів, наприклад, 0.3 або 0.42, — *оцінка ймовірності*.

З дослідів з монетою можна зробити кілька важливих висновків, які застосовуються також до надійності:

1. монета має певну істинну ймовірність випадання герба при киданні. Коли монету ніщо не впливає, справжня ймовірність такого результату дорівнює1/2;

2. оцінка істинної ймовірності можна отримати на підставі обмеженого числа випробувань. У прикладі з монетою ми отримали оцінку 0,3 при 10 дослідах та 0,42 при 100 дослідах;

3. що більше число випробувань, то ближче оцінка до істинної ймовірності;

4. коли справжня ймовірність події невідома, існує експериментальний спосіб оцінки – проведення серії випробувань;

5. Якщо кількість випробувань мала, оцінка може суттєво відрізнятись від істинної ймовірності; вона може бути завищеною або заниженою, але може бути близькою до істинної ймовірності. Оцінками, отриманими за результатами невеликої кількості дослідів, слід користуватися обережно.

Кількість дослідів («випробувань»), з яких отримано оцінку ймовірності, є мірою достовірності отриманої оцінки. Статистичні методи дозволяють за отриманими оцінками та відомим числом дослідів визначити довірчі інтервали істинної ймовірності та довірчу ймовірність того, що істинна ймовірність знаходиться в цих межах.

Співвідношення між ймовірністю події та її оцінкою, отриманої з N дослідів, встановлюється математично за допомогою граничного переходу. Якщо в N дослідах з'явилося n результатів, що сприяють події, ймовірність якої потрібно оцінити, то оцінка ймовірності визначається як відношення:

 (1.1)

Для оцінки ймовірності прийнято використовувати позначення *P*. Істинна ймовірність *P* визначається як межа:

 (1.2)

Звідси отримуємо визначення: істинною ймовірністю називається межа відношення числа сприятливих наслідків до загальної кількості випробувань при необмеженому збільшенні загальної кількості випробувань.

Недоліком такого визначення істинної ймовірності є те, що якщо нам невідомо значення істинної ймовірності *апріорі*, то ми ніколи не зможемо точно визначити його, оскільки здійснення нескінченного числа дослідів неможливе. Все, чого можна досягти, – це найкращих або найгірших оцінок залежно від кількості випробувань, Ось чому теорія розрізняє справжню ймовірність та оцінку ймовірності.

Отже, ми будемо для позначення ймовірності користуватися символом *P* і лише в тих випадках, коли цікавлять довірчі інтервали, будемо розрізняти справжню ймовірність і її оцінку. Але при цьому завжди необхідно пам'ятати, що якщо ймовірність отримана з небагатьох дослідів, вона може являти собою (хоч і не обов'язково) лише оцінку ймовірності.

Зауважимо, що розрахунок надійності, будучи імовірнісним розрахунком, використовує моделі, що ідеалізуються. Наприклад, якщо в результаті великої кількості випробувань відомо, що надійність системи дорівнює 0.9 або дуже близька до 0.9, то з цього зовсім не випливає, що ця система з операцій 9 виконає задовільно і тільки один раз відмовить. Можливо, що буде 2 чи 3 відмови, а може бути не буде жодного. Але з великої кількості дослідів близько 90% буде без відмов і близько 10% – з відмовами. Отже, можна уявити ідеальну модель нашої системи, яка буде безвідмовно працювати точно в 9 з 10 операцій. Використовуючи цю модель, очікується, що з 1000 операцій 900 мають бути повністю успішними, а 100 мають закінчитися відмовою. І якщо наша оцінка надійності числом 0,9 була хорошою оцінкою, вийде, що реальна система дає в 1000 операцій результати, які дуже не відрізняються від ідеалізованої моделі. Тоді з упевненістю можна стверджувати, що реальна система має можливість 0,9 для виконання кожної окремої операції.

Однак навіть для ідеалізованої моделі не можна передбачити, в якій із 10 послідовних операцій має відбутися відмова, так само як неможливо передбачити, за якого підкидання монети має випасти цифра. Сама природа ймовірності така, що вона дозволяє нам дуже точно передбачити кількість певних подій у великій кількості випробувань, але не дозволяє передбачити результати окремого випробування.

Надалі ми будемо широко користуватися теоремами теорії ймовірностей, і особливо теореми складання, теореми множення та формулою Байєса. При цьому передбачається, що студентам відомі ці теореми і вони знайомі з основами математичної статистики.

Як було сказано, під надійністю апаратури розуміється можливість безвідмовної роботи в заданий проміжок часу тривалістю t. Цю ймовірність можна знайти за допомогою точних імовірнісних та статистичних розрахунків. Отримана оцінка може мало відрізнятися від справжньої надійності апаратури. При порівнянні з фактичним досвідом, накопиченим в результаті експлуатації апаратури, виявляється, що при великій кількості операцій розрахункові дані узгоджуються з досвідченими даними, але відповідність зазвичай стає гіршою, якщо розрахунок ґрунтується на невеликій кількості випробувань. Для порівняння з досвідченими даними величину надійності розраховують за середніми значеннями, що визначаються внаслідок великої кількості спостережень. Так, у прикладі з симетричною монетою з ймовірністю результату 1/2 при оцінці результату по 10 спостереженнях може виявитися, що 1/2 не є точним значенням ймовірності цього результату. Але при врахуванні результатів 100 або 1000 підкидів монети ми швидко виявляємо, що 1/2 є найкращим значенням і що використання будь-якої іншої величини, отриманої за першими кількома підкидами, лише відводить у бік реальної дійсності.

# Лекція 2. ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ

Перш ніж приступити до чисельної оцінки та розрахунків надійності, необхідно дати визначення надійності. Недостатньо сказати, що вона є ймовірністю. Імовірністю чого? По відношенню до монети ймовірність 1/2 має сенс у тому разі, якщо вказується, що це ймовірність випадання цифри чи герба. Це не ймовірність попадання монети на ребро (ця ймовірність вважається нульовою) і не ймовірність перевертання її в повітрі певну кількість разів. Величина ймовірності завжди належить до певної події.

Загальноприйняте визначення надійності свідчить: «Надійність - це можливість виконання пристроєм свого призначення відповідно до вимог, що пред'являються протягом заданого часу за даних умов роботи». Це визначення означає, що надійність - це ймовірність того, що пристрій не відмовить під час виконання потрібного завдання протягом заданого часу. Таку можливість називають також *ймовірністю безвідмовної роботи*. У більшості випадків ймовірність, з якою пристрій виконуватиме завдання, заздалегідь невідома. Цей випадок відрізняється від випадку з симетричною монетою, де ймовірність випадання цифри або герба відома, і твердження, що ця ймовірність дорівнює 1/2, може бути зроблено зі 100% впевненістю. Випадок надійності можна порівняти з несиметричною монетою, яка має певну схильність випадати переважно гербом чи цифрою. Така монета матиме певну ймовірність випадання герба, але значення цієї ймовірності невідоме. Цю ймовірність можна оцінити за допомогою серії випробувань і статистичної обробки результатів, що спостерігаються. Чим більше число випробувань, тим ближча оцінка до істинної ймовірності і тим більша впевненість у правильності оцінки.

Саме з такою проблемою стикаються щодо надійності. Справжня надійність ніколи точно не відома, а це означає, що невідоме точне чисельне значення ймовірності задовільного функціонування апаратури. Але чисельні оцінки, досить близькі до шуканої величини, можна отримати шляхом використання статистичних методів та імовірнісних розрахунків. Наскільки точно статистична оцінка надійності відбиває справжню надійність, залежить від кількості випробувань, повноти інформації про відмови та інших основних даних.

Коли оцінка надійності проводиться шляхом ймовірнісних розрахунків, точність оцінки у разі складної апаратури залежить від того, наскільки добре відомі дані про надійність складових апаратуру елементів за заданих умов її експлуатації. Для статистичної оцінки апаратури (тобто оцінки ймовірності того, що апаратура безвідмовно і задовільно буде виконувати відповідні функції) вона повинна бути приведена в дію, і її характеристики повинні зніматися протягом заданого часу в реальних польових умовах експлуатації або досить добре імітують їх умовах лабораторії

Подія, ймовірність якого оцінюється, полягає у задовільності виконання апаратурою відповідних функцій протягом певного часу. Критерії «задовільного функціонування» мають бути заздалегідь визначені для кожного випадку. Якщо проводяться лабораторні випробування, то робочі режими та умови середовища також повинні бути точно визначені, тому що отримана оцінка надійності буде стосуватися тільки тих робочих режимів та умов середовища, за яких проводилося випробування. Суворе формулювання завдання, яке має виконувати апаратура (у вигляді точної витримки з інструкції з експлуатації або у вигляді завдань необхідних характеристик), настійно необхідне, тому що тільки за цієї умови можуть бути зафіксовані всі випадки відмов і точно визначено поняття «відмова».

Для кількісної характеристики якості роботи пристрою потрібний вимір всіх найважливіших показників (параметрів). Поки ці параметри залишаються в межах, які визначаються технічними умовами, вважається, що пристрій працює задовільно. Коли показники виходять за межі допусків, пристрій вважається несправним або таким, що відмовив. Наприклад, якщо бортова система енергоживлення літака складається з чотирьох генераторів по 30 кВт кожен, тобто її сумарна потужність дорівнює 120 кВт, а загальна споживана потужність не перевищує 60 кВт, то система живлення не відмовить, якщо один або два генератори в польоті вийдуть з ладу. Задовільна робота системи харчування у разі визначається як здатність системи виробляти потужність 60 кВт, а відмова системи настає лише тоді, коли чотири генератора неспроможна виконати це завдання. Отже, два генератори можуть відмовити, а система все ж таки працюватиме задовільно.

Відразу очевидно, що якщо загальне навантаження збільшиться до 70 кВт, система буде набагато менш надійною, ніж при навантаженні 60 кВт, хоча в самій системі жодних змін не відбулося. Дійсно, у цьому випадку допускається відмова лише одного генератора, так як при відмові двох генераторів система вже не в змозі виробити 70 кВт. Щоб не перевантажувати генератори, деякі навантаження мають бути відключені, але тоді якість роботи системи вже не буде «задовільною». Насправді для нас може становити інтерес кілька рівнів надійності у такій системі. Наприклад, у випадку з чотирма генераторами та загальним навантаженням 60 кВт може бути потрібна надійність системи, що забезпечує лише ці 60 кВт. Але можна також цікавитися надійністю системи, призначеної для живлення найважливіших споживачів загальною потужністю, скажімо, 25 кВт. Нарешті, нас може цікавити надійність системи, що призначена для живлення мінімальною кількістю електроенергії в самому критичному випадку. Зрозуміло, що надійність системи у всіх цих трьох випадках буде різною, насправді так і буває.

Точне визначення поняття «задовільне функціонування» дуже важливе в дослідженнях надійності, оскільки потрібно знайти ймовірність, з якою обладнання буде задовільно виконувати задану функцію.

З погляду теорії ймовірностей задовільна якість роботи безпосередньо з поняттям відмови, чи несправності. Зв'язок між цими поняттями такий самий, як між двома взаємно виключаючими подіями: обладнання може бути лише в одному з двох станів – задовільна робота чи відмова. Іноді буває простіше визначити, що таке "відмова", або "несправність". Тоді поняття задовільного функціонування буде застосовне до всіх тих станів системи, які є відмовою. Якщо не зроблено такого чіткого розмежування та існує якийсь третій стан, то з'явиться необхідність оцінки більш ніж однієї надійності, оскільки в цьому випадку потрібно буде розглянути щонайменше три ймовірності: ймовірність того, що було названо задовільним функціонуванням, ймовірність відмови чи несправності та ймовірність третього результату. Такого підходу можна уникнути, і це слід зробити, бо він ускладнює розрахунки, особливо під час випробувань на надійність. Якщо для однієї системи має бути обчислено кілька ймовірностей, найпростішим підходом є розчленування проблеми на складові та вирішення кожної окремо, використовуючи принцип двох взаємовиключних подій.

Коли дано чітке визначення поняття «задовільне функціонування», ми можемо розпочати обчислення надійності. Оцінка задовільності функціонування потребує виявлення випадків незадовільної роботи, отже, вона потребує виявлення відмов та несправностей. Частота, з якою відбуваються відмови та несправності, використовується як параметр математичного визначення надійності. Цей параметр називається *інтенсивністю відмов* і зазвичай вимірюється числом відмов за 1 годину роботи. Зворотний розмір називається *середнім напрацюванням на відмову* і вимірюється в годинах.

Слід особливо наголосити на необхідності точного визначення призначення пристрою та його задовільного функціонування, з одного боку, та відмови або несправності – з іншого.

У деяких випадках розпізнавання задовільної якості роботи чи несправності вдається легко. Наприклад, перемикач або спрацьовує або не спрацьовує. У таких випадках нескладно сформулювати призначення пристрою (замикання або розмикання ланцюга за допомогою перемикача) та визначити, що мається на увазі під «задовільним функціонуванням», а також під «несправністю» або «відмовою». Однак набагато частіше доводиться зустрічатися з такими випадками, коли нелегко зробити таке ясне розмежування і необхідно спочатку визначити деяку кількість характерних параметрів та їх меж. Робота в межах допусків вважається такою, що відповідає вимогам, або задовільною, а поза межами цих допусків – незадовільною.

Для раптових відмов величина інтенсивності відмов (яка може бути визначена за кількістю відмов протягом досить великого часу роботи пристрою) дозволяє розрахувати надійність апаратури за допомогою простої формули, яка буде наведена в наступній лекції. Інтенсивність відмов визначається експериментально у випробуваннях на надійність або під час експлуатації обладнання.

Поняття «задовільне функціонування», або «задовільна якість», саме собою ще не характеризує достатньо ймовірності успішного виконання складних операцій. Функції навіть простих пристроїв часто є дуже складними процесами. Зазвичай для нормального функціонування пристрою має працювати велика кількість деталей. Якщо апаратура складається з великої кількості елементів, кожен із яких сам виконує складні функції, проблема стає складною. Якщо всі елементи працюють нормально, апаратура зазвичай працюватиме справно. Але це не завжди вірно. Бувають випадки, коли характеристики всіх елементів знаходяться в межах допусків, а апаратура все-таки працює незадовільно внаслідок такого відходу характеристик групи окремих елементів у межах допусків, що сумарний ефект призводить до виходу вихідних характеристик апаратури за межі допусків. У разі можна сказати, що недоліки мають окремі елементи, а апаратура загалом. Подібні відмови найчастіше відбуваються в електронних системах. Для їх усунення потрібно правильне проектування електронної системи, що припускає спільний догляд характеристик кількох елементів. І навпаки, бувають такі ситуації, коли елемент відмовляє, а апаратура все ж таки працює задовільно. Це особливо має місце у разі резервування. Елементи, що резервуються, вузли тощо включаються в обладнання спеціально для забезпечення задовільної роботи апаратури у разі часткових відмов.

Оскільки надійність є мірою можливості апаратури виконувати певні функції в заданому проміжку часу, природно вимірювати її часовим параметром. Таким параметром може бути якась одиниця часу, що переважно у разі безперервного режиму роботи. За такий параметр може бути взято число циклів, що зручно, коли обладнання працює з перервами, протягом регулярних або нерегулярних періодів. Нарешті, може бути використана комбінація обох показників. У годинах роботи має сенс виражати термін служби машини, генератора, літака і т. д. Але для перемикачів або реле зручнішою одиницею вимірювання є число циклів або операцій, які має виконувати даний пристрій. Імовірність безвідмовної роботи за певну кількість циклів у цих випадках може бути вказана точніше, ніж ймовірність безвідмовної роботи протягом певного часу. Довговічність перемикача розумніше виражати кількістю перемикань, ніж числом годин роботи. Таким чином, довговічність перемикача краще вимірювати в циклах, а не годинах.

Проте число циклів часто можна пов'язати з довговічністю в годинах, особливо у випадках, де існує деяка регулярність робочих циклів. Наприклад, якщо відомо, що в середньому перемикач спрацьовує 5 разів протягом 10 годин, його надійність, виражена або числом циклів спрацьовування, або в одиницях тривалості роботи, може мати те саме кількісне ймовірнісне значення. Але той же перемикач, будучи використаний в іншій системі, де він виконує 100 перемикань протягом 10 годин роботи, матиме нижчу надійність для 10 годин, ніж у першому випадку. Число годин залишилося незмінним, але число циклів змінилося. Тому зв'язок між часом та іншими параметрами довговічності (наприклад, циклами чи періодами) необхідно щоразу встановлювати наново.

Перехід від циклів до годин може бути дуже корисним при складних імовірнісних розрахунках. Такий перехід призводить до довговічності елемента до загального параметра і значно спрощує математичні викладки.

# Лекція 3. ЕКСПОНЕНЦІЙНИЙ ЗАКОН РАПТОВИХ ВІДМОВ

У найпростішому випадку, коли відмови пристрою відбуваються лише у випадкові моменти часу та середнє значення кількості відмов однаково для рівних за тривалістю періодів роботи, надійність пристрою математично визначається добре відомою експоненційною формулою:

 (3.1)

Тут *е* - основа натуральних логарифмів (*е* = 2,71828 ...), λ - постійна, звана інтенсивністю раптових відмов, *t* – довільний час роботи, для якого визначається надійність пристрою *R*. Інтенсивність відмов повинна виражатися в одиницях, обернених тим, яких виражено час *t* (як правило, що виражається в годинах). Тоді надійність *R* є ймовірністю того, що пристрій з постійною інтенсивністю відмов λ не відмовить протягом заданого часу роботи *t*.

Ця формула надійності справедлива для всіх пристроїв, які пройшли належне приробіток, вже не виявляють «приробіткових» відмов, але ще й не відчувають певною мірою впливу зносу, тобто погіршення характеристик у результаті старіння. Період роботи, для якого справедлива наведена вище формула, називається *періодом нормальної експлуатації пристрою*. Тривалість цього періоду є різною для різних пристроїв. Важливо відзначити, що час *t* у формулі (3.1) ніколи не перевищує період нормальної експлуатації пристрою.

Наприклад, якщо період нормальної експлуатації елемента становить лише 1000 годин, то використовуючи формулу (3.1), можна отримати надійність елемента для будь-якого часового інтервалу в межах цих перших 1000 годин. Однак формула дає неправильну відповідь, якщо обраний часовий інтервал виходить за межі періоду нормальної експлуатації, поза якою інтенсивність відмов починає монотонно зростати. У період нормальної експлуатації надійність пристрою приблизно однакова для рівних тривалості часів роботи. Так, наприклад, надійність для перших 10 годин періоду нормальної експлуатації буде такою самою, як і для останніх 10 годин, тобто надійність одна і та ж для десятигодинної роботи від 0 до 10 годин і від 990 до 1000 годин.

Для ілюстрації цього положення припустимо, що пристрій з 1000-годинним періодом нормальної експлуатації має за певних навколишніх умовах постійну інтенсивність відмов λ=0.0001 на годину. Надійність пристрою для будь-яких 10 годин роботи в межах цих 1000 годин дорівнює:



тобто *R* =99,9%.

Імовірність того, що пристрій не відмовить за весь 1000-годинний період нормальної експлуатації, дорівнює:



Таким чином, пристрій з 90% впевненістю безвідмовно пропрацює 1000 годин, що відраховуються від того моменту, коли воно вперше вводиться в дію. Але якщо пристрій вже безвідмовно працювало 990 годин, то можливість безвідмовно пропрацювати останні 10 годин періоду нормальної експлуатації (від 990 до 1000 годин) знову дорівнює R = 0,999.

Однак якщо цей пристрій буде продовжувати безперервно працювати понад період 1000 годин, то почне позначатися його знос, і надійність пристрою для наступних 10 годин роботи почне зменшуватися, причому іноді дуже швидко, в силу зростання інтенсивності відмов. Звідси випливає, що в межах періоду нормальної експлуатації надійність припрацьованого пристрою постійна для рівних тривалості часових інтервалів за умови, що весь попередній час пристрій працював безвідмовно. Однак якщо пристрій досяг кінця періоду нормальної експлуатації, надійність його більш-менш швидко зменшується.

Першу частину цього твердження можна сформулювати так: надійність пристрою, або ймовірність того, що пристрій не відмовить протягом заданого тимчасового інтервалу, є простою експоненційною функцією тимчасового інтервалу, якщо відомо, що пристрій безвідмовно працював аж до початку виділеного інтервалу і що цей інтервал не виходить межі періоду нормальної експлуатації системи.

Параметр λ повністю визначає надійність пристрою. У розрахунках часто використовуватимемо величину, обернену інтенсивності відмов, *m*, звану *середнім напрацюванням на відмову*. За визначенням для експоненційного випадку:

 (3.2)

Цей тимчасовий параметр, як і λ, повністю визначає надійність пристрою або системи при експонентному законі наростання відмов. Функцію надійності *R*(*t*), яка називається іноді також *функцією ймовірності безвідмовної роботи*, можна записати тому і в такій формі:

 (3.3)

На малюнку 1 представлений графік ймовірності *R*(*t*) роботи безвідмовної як функції часу *t*. Слід враховувати, що абсцис *t* не вимірює поточний час або загального сумарного часу роботи пристрою з моменту виготовлення. Час *t* становлять лише годинник якогось довільно вибраного періоду роботи, причому *t*=0 означає початок періоду, що розглядається, а не той календарний нуль часу, коли пристрій вперше вступає в дію. Щоб відрізняти загальний сумарний час роботи пристрою від заданого тимчасового інтервалу роботи, було б доцільно використовувати для першого позначення *Т*, а для другого *t*. Однак, якщо завжди пам'ятати про відмінність цих двох часів, можна в тому й іншому випадку користуватися одним і тим же позначенням *t*.

|  |
| --- |
| b  Мал. 1. Крива надійності: *а* – в інтервалі *m*∈(0…*m*/10); *b* – *а* – в інтервалі m∈(0…3*m*) |

Отже, час *t* у формулі (3.3) вимірюється в годинах або інших одиницях часу роботи пристрою протягом довільно вибраного періоду незалежно від того, скільки годин пристрій вже пропрацював до цього виділеного періоду. Це дозволяє розрахувати ймовірність безвідмовної роботи пристрою (*R*) протягом будь-якого тимчасового проміжку в межах періоду нормальної експлуатації пристрою, тобто за час завдання, що має деяку тривалість *t*, що відраховується від моменту *t*=0, що означає початок завдання. Тому *t* часто називають *часом виконання завдання*. Передбачається, що пристрій безвідмовно виконав попередні завдання та що під час виконання цього завдання не закінчиться його період нормальної експлуатації. Перше припущення записується як умови: *R*=1 при *t*=0 і означає, що пристрій справно до початку операції. Друге припущення міститься у вихідному припущенні: λ= const, на якому заснована формула (3.1).

З графіка мал.1 випливає, що час не обмежений, що здавалося б, не має сенсу. Однак якщо враховуються лише раптові відмови, то ймовірність відмови пристрою стане рівною одиниці лише за необмеженої тривалості роботи. Іншими словами, можливість безвідмовної роботи пристрою дорівнює нулю тільки для нескінченно великого значення *t*. Зрозуміло, що з цих твердженнях знос до уваги не береться. Звичайно, якщо пристрій і не відмовляє через випадкові причини, він рано чи пізно відмовить внаслідок зносу. Але тут розглядаються лише раптові відмови, а це означає, що працездатність пристрою поза періодом нормальної експлуатації не визначається.

У практиці дослідження надійності зазвичай потрібно знайти можливість безвідмовного виконання завдання певної тривалості. Тривалість завдань майже завжди менше періоду нормальної експлуатації пристрою і зазвичай набагато менше середнього напрацювання на відмову. Отже, розрахунок надійності зазвичай проводиться для тих проміжків часу, які відповідають крайній лівій частині кривої надійності.

На цій кривій є деякі точки, які легко запам'ятати. Вони виявляються дуже корисними, якщо потрібно отримати перше грубе передбачення надійності. Перед їх розглядом слід звернути увагу на «схожість» формули (3.3) на вираз з теорії автоматичного управління (ТАУ) рішення для інерційної ланки першого порядку. Величина середнього напрацювання на відмову *m* при нормальній експлуатації є своєрідним аналогом постійної доби інерційної ланки з усіма супутніми особливостями. Можливість безвідмовної роботи пристрою протягом інтервалу часу не менше t = m дорівнює лише 0.368 (або приблизно 0.37). Практично це означає, що якщо включено і працює 100 однотипних елементів, то через *t*=*m* годин приблизно всього 37 їх залишаться працездатними, тоді як приблизно 63 елементи відмовлять. Для *t*=*m*/10 крива дає надійність *R*=0.9, *t*=*m*/100 надійність дорівнює 0.99, для *t*=*m*/1000 вона дорівнює 0.999. Надійність 0.999 означає, що з 1000 однакових елементів, що пропрацювали *t*=*m*/1000 годин, приблизно 999 будуть справні, а один відмовить. Так само з кривої надійності отримуємо, що з часу роботи *t*=*m*/10000 надійність дорівнює приблизно 0.9999, для *t*=*m*/100000 – 0.99999, а *t*=*m*/1000000 – 0.999999.

Ці точки на кривій надійності застосовні до будь-яких елементів та систем з експонентним законом відмови. Отже, крива надійності, у якій m використовується як одиниця часу, є стандартною кривою. Для елемента величини *m* і *R* стандартної кривої означають відповідно середнє напрацювання на відмову та надійність цього елемента. Аналогічно для системи величини *m* і *R* стандартної кривої означають середнє напрацювання на відмову та надійність системи.

Таким чином, якщо від елемента вимагається надійність 0.999999 для 1 години роботи, то він повинен мати середнє напрацювання на відмову, рівну 1 000 000 годин. Якщо від системи потрібна надійність 0.9999 для 1 години роботи, вона повинна мати середнє напрацювання на відмову 10000 годин. Для 10 годин роботи та сама система матиме надійність приблизно 0.999, а для 100 годин роботи – приблизно 0.99.

Існує певне співвідношення між надійністю елемента, числом елементів у системі та надійністю системи.

Якщо елемент має надійність 0.999 для *t*=*m*/1000 годин, це означає, що з 1000 таких елементів, що пропрацювали *t*=*m*/1000 годин, приблизно один відмовить, а 999 будуть справні. Імовірність того, що всі 1000 елементів пропрацюють безвідмовно *m*/1000 годин, дорівнює лише 0.368. Отже, система, що складається з 1000 таких елементів, мала б надійність, рівну 0.368 для *m*/1000 годин безвідмовної роботи за умови, що відмова будь-якого з елементів викликає відмову системи. Тому середнє напрацювання на відмову системи становить лише *m*сист = *m*/1000 годин. Але якщо система складається з 100 подібних елементів, то ймовірність того, що протягом *t*=*m*/1000 годин відмовить один або більше цих елементів, приблизно дорівнює 100/1000=0.1. Отже, надійність системи або можливість безвідмовної роботи протягом часу *t*=*m*/1000 годин дорівнює приблизно 0.9. Якщо, нарешті, система містить лише 10 елементів, то ймовірність відмови одного або більше одного з них за час *m*/1000 годин приблизно дорівнює 10/1000=0.01. Отже, надійність системи матиме значення, що дорівнює приблизно 0.99 для *t*=*m*/1000 годин роботи. Середнє напрацювання на відмову дорівнює відповідно *m*/10.

З усього сказаного слід, що система, що складається з *n* однакових елементів, у кожного з яких середнє напрацювання на відмову дорівнює *m* години, має середнє напрацювання на відмову *m*/*n* години, якщо відмова будь-якого елемента викликає відмову системи. Це відноситься також і до різних елементів, якщо під *m* розуміти середнє значення напрацювань на відмову не однотипних елементів.

Нарешті, слід згадати, що величину *m* необов'язково ставити в одиницях часу. У ряді випадків зручніше тимчасові одиниці замінювати іншими, які краще характеризують працездатність апаратури. Наприклад, для комутувальних пристроїв (перемикачі, реле і т. д.) число робочих циклів служить більш відповідним заходом працездатності, ніж кількість годин роботи. У таких випадках тимчасову шкалу як абсцис кривої надійності замінюють шкалою числа циклів, а величина *m* трактується як середнє число циклів між відмовими. Зворотний їй величина – інтенсивність відмов за робочий цикл.

Так, наприклад, перемикач, для якого середня кількість циклів між відмовими дорівнює *m*, виконує *m*/100 циклів роботи з надійністю 0.99, для *m*/1000 циклів надійність його дорівнює 0.999 і т. д. Формули (3.1) та (3.3) можна тоді переписати, підставляючи замість часу *t* число циклів *с*:

 (3.4)

У цій формулі *с* – число робочих циклів, для яких потрібно обчислити надійність комутувального пристрою, *m* – середня кількість циклів між відмовими пристрою, а λ – інтенсивність відмов пристрою, виражена в числі відмов на один цикл. Надійність одного перемикання для такого комутуючого пристрою тоді дорівнюватиме:

 (3.5)

Причому для малих інтенсивностей відмов λ справедлива наближена формула *R*(1)=1-λ.

Надійність одного перемикання часто використовується в розрахунках надійності тих систем, які містять перемикачі або реле, що включаються лише один раз упродовж роботи системи. У тих випадках, коли перемикач виконує задану кількість операцій за час роботи системи *t*, можна встановити зв'язок між числом робочих циклів *с* і числом годин роботи *t*, тобто висловити надійність перемикача через час роботи *t*. При складних розрахунках надійності цей прийом можна використовувати з метою спрощення обчислень.

# Лекція 4. ВИСНОВОК ЗАГАЛЬНОЇ ФОРМУЛИ ДЛЯ ФУНКЦІЇ НАДІЙНОСТІ

У лекції 3 експонентна формула (3.1) була використана для оцінки надійності тих пристроїв та систем, які мають постійну інтенсивність відмов. У цій лекції буде показано, що експонентну формулу можна отримати з основного визначення ймовірності. В результаті буде знайдено загальну формулу надійності, яка залишається справедливою завжди незалежно від того, чи буде інтенсивність відмов постійною чи змінною. Формула (3.1) є лише окремим випадком цієї загальної формули.

Імовірність події *А* визначається як відношення числа результатів, сприятливих для події *А*, до загального числа випробувань за умови, що при кожному випробуванні ймовірність події *А* однакова.

Нехай кожне випробування закінчується або результатом, сприятливим події *А*, або несприятливим результатом (ця обставина позначимо через ). Тоді, якщо *Х* – число наслідків, сприятливих події *А*, *Y* – число наслідків, сприятливих на подію , а загальна кількість випробувань дорівнює *Х*+*Y*, то ймовірність події *А* дорівнює:

 (4.1)

Аналогічно для події  маємо:

 (4.2)

Строго кажучи, ймовірності, розраховані за формулами (4.1) і (4.2), є лише наближенням до вірогідності *Р*(*А*) і *Р*(). Їхні точні значення можуть бути отримані тільки шляхом нескінченно великої кількості випробувань. Але якщо кількість випробувань *Х*+*Y* досить велика, оцінка буде близька до вірогідності. Якщо під подією *А* розуміти справність елемента, а під подією  – його відмова, можна, використовуючи наведене вище визначення ймовірності, визначити надійність елемента як ставлення кількості елементів, витримали випробування, до кількості елементів, що брали участь у випробуванні.

При багаторазовому випробуванні фіксованої кількості *N*0 елементів протягом часу *t* до кінця випробувань має бути *Nспр* справних елементів і *N*від відмовили. Отже, *N*0=*N*спр+*N*від є постійною величиною протягом досвіду, оскільки кількість елементів *N*від, що відмовили, збільшується рівно на стільки, на скільки зменшується кількість справних елементів *Nспр*.

Надійність (або ймовірність «виживання») відповідно до визначення ймовірності для будь-якого моменту часу t протягом випробування виражається відношенням:

 (4.3)

де *N*спр або *N*від визначаються за час випробування t. Якщо випробування продовжується і величина *N*спр зменшується у зв'язку з тим, що дедалі більше елементів відмовляє, то надійність також пропорційно зменшується.

Отже, надійність, виміряна у такому випробуванні, є функцією часу роботи. Аналогічним чином можна визначити і можливість відмови *Q* (або *ненадійність*):

 (4.4)

Вочевидь, що з будь-якого моменту часу *t* справедлива рівність *R*+*Q*=1. Події "елемент відмовив" і "елемент справний" називають *взаємно виключаючими*, або *протилежними подіями*.

Число елементів, що витримали випробування, дорівнює *N*спр = *N*0-*N*від. Отже, надійність можна також записати у вигляді:

 (4.5)

Диференціюючи обидві частини (4.5) по *t* і враховуючи, що *N*0 = const, отримаємо:

 (4.6)

Звідси визначається швидкість відмов елементів:

 (4.7)

Оскільки  то:



Формула (4.7) характеризує також «швидкість виживання» елементів, яка дорівнює швидкості відмов із протилежним знаком.

Розділивши тепер обидві частини (4.7) на *N*спр отримаємо зліва інтенсивність відмов λ:

 (4.8)

Оскільки , то , і, підставивши цю величину (4.8), отримуємо:

 (4.9)

Ця формула є найбільш загальним виразом інтенсивності відмов. Вона справедлива як експоненційних, так не експоненціальних законів. У загальному випадку λ є функцією часу роботи *t*, оскільки і *R* і  є функціями часу. Тільки в одному випадку (при експонентному законі надійності) величина λ у формулі (4.9) виявляється постійною. Розділяючи змінні та інтегруючи, отримаємо з (4.9):



Оскільки при *t*=0 отримуємо *R*=1, дозволяючи щодо *R*, отримаємо:

 (4.10)

Досі на інтенсивність відмов λ не було накладено жодних обмежень, тому λ може бути будь-якою інтегрованою функцією часу *t*. Отже, функція *R*(*t*) у формулі (4.10) виражає надійність у найбільш спільній формі, яка може застосовуватися для всіх можливих видів розподілу відмов.

Якщо (4.10) вважати λ постійною, отримаємо:



і приходимо до добре відомої експоненційної формули надійності:

 (4.11)

Доцільно відзначити, що наведений висновок може допомогти у вимірі інтенсивності відмов елемента. Скористайтеся формулою (4.8). Якщо λ постійно, те й добуток  має бути постійним у процесі випробування. Це означає, що 1/*N*спр та *dN*від/*dt* повинні або зменшуватися з однаковою швидкістю, або підтримуватися постійними з початку випробування.

Простий спосіб вимірювання постійної інтенсивності відмов полягає у підтримці постійного числа елементів у процесі випробування шляхом негайної заміни елементів, що відмовили новими. Число справних елементів *N*спр, протягом випробування буде дорівнює *N*0 тобто буде завжди дорівнює початковому значенню. Отже, 1/*N*спр=1/*N*0 постійно, і *dN*від/*dt* у цьому випробуванні також має бути постійним, якщо постійна інтенсивність відмов. Але *dN*від/*dt* буде постійним тільки в тому випадку, якщо загальна кількість елементів *N*від, що відмовили, в процесі випробувань буде збільшуватися пропорційно часу, тобто за лінійним законом. Якщо *N*від елементів відмовило за час *t* (з постійною швидкістю), то кількість елементів, що відмовили за одиницю часу, дорівнює *N*від/*t* і в цьому випробуванні можна замінити *dN*від/*dt* на *N*від/*t*, а 1/*N*спр на 1/*N*0. Тоді:

 (4.12)

Таким чином, потрібно підрахувати лише кількість відмов *N*від та час роботи *t*. Тоді стала інтенсивність відмов визначиться ставленням числа відмов до добутку *N*0·*t*. Зрозуміло, такий спосіб визначення інтенсивності відмов можливий лише за умови λ=const.

Якщо випробовується тільки один елемент (*N*0=1), але він відновлюється так, що випробування може продовжуватися після кожної відмови, то , де в *t* входить тільки безпосередній час випробування.

У разі коли випробовується кілька елементів, добуток *N*0·*t* виражає сумарне напрацювання всіх зразків протягом випробування. З (4.12) видно, що інтенсивність відмов має розмірність «число відмов за годину», якщо t виміряно у годинах. Якщо час замінюється числом циклів, то інтенсивність відмов може бути виражена кількістю відмов, що припадають на 1 цикл.

У формулу (4.6) було введено похідну *dR*/*dt*, сенс якої необхідно пояснити. З мал. 3.1 слід, що *dR*/*dt* являє собою нахил кривої R у довільній точці *t*. Цей нахил скрізь негативний і зменшується від початкового значення -1/*m* (при *t*=0) до 0 (при *t*=∞). Негативний знак нахилу випливає з (4.6):



У цій формулі *dN*від/*dt* є частотою, з якою в будь-який момент часу відбуваються відмови при випробуваннях, що проводяться без заміни елементів, що відмовили. Якщо побудувати графік *dN*від/*dt* як функцію *t*, отримаємо розподіл відмов всіх початкових елементів *N*0. Графік (1/*N*0)(*dN*від/*dt*) дає розподіл відмов у часі, віднесене до вихідних елементів, або криву частоти відмов. Отже, графік функції (1/*N*0)(*dN*від/*dt*) матиме такий самий характер, як і графік *dN*від/*dt*, тільки всі його ординати будуть розділені на постійне число *N*0. Ця функція називається *щільністю ймовірності відмов*:

 (4.13)

Загальна площа, обмежена відповідною кривою, дорівнює 1. Інтенсивність відмов у (4.9) може бути записана також у вигляді:

 (4.14)

Це означає, що інтенсивність відмов для будь-якого моменту часу *t* дорівнює величині *f*(*t*), поділеної на надійність, взяту для того ж значення *t*. Формула (4.14) справедлива всім можливих розподілів як експоненціальних, так та не експоненціальних.

В окремому випадку, коли λ постійна, маємо:

 (4.15)

Той самий результат можна отримати, якщо для виведення щільності ймовірності відмов використовувати формулу (4.4). Тоді:

 (4.16)

так як  . Інтегруючи (4.16), отримаємо:

 (4.17)

Це означає, що можливість відмови *Q* за час *t* дорівнює площі під кривою щільності *f*(*t*) в інтервалі від 0 до *t*. Ця площа зростає зі збільшенням часу роботи *t*, отже, ймовірність відмови також збільшується з часом. Таким чином, *Q*(*t*) є інтегральною функцією розподілу відмов.

Природно, що можливість справної роботи, або надійність, повинна зменшуватися зі збільшенням часу *t*. Оскільки *R*=1-*Q*, то:



та враховуючи, що , можна записати:

 (4.18)

Це означає, що ймовірність справної роботи зменшується відповідно до зменшення площі під кривою щільності *f*(*t*), як показано на мал. 2, на якій представлена крива густини ймовірності для експоненційного випадку.

|  |
| --- |
| Мал.2. Експонентна функція щільності |

Загальна площа під цією кривою завжди дорівнює одиниці:



Це також стосується загального випадку, коли



Дійсно, при цьому маємо:



Аналогічно тотожність:



завжди справедливо незалежно від виду розподілу.

Інтенсивність відмов може бути виражена також через *Q*:

 (4.19)

Тут важливо відзначити, що інтенсивність відмов завжди дорівнює відношенню щільності до надійності. В експонентному випадку це ставлення постійно. У всіх інших випадках воно змінюється у часі, і інтенсивність відмов тоді є функцією часу.

# Лекція 5. ПЕРІОД НОРМАЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ

Вище розглядався випадок постійної інтенсивності відмов. Це означає, що якщо взяти велику кількість елементів, включити їх у роботу в постійних умовах і замінювати елементи в міру їх відмови, то досить великі і рівні проміжки часу відбудеться приблизно однакове число відмов. Однак при цьому необхідно насамперед вимагати, щоб якість елементів було приблизно однаковим на початку випробування, і щоб за час випробування не наступало зношування елементів. Раптові відмови, які виникають не через зносові пошкодження елемента, іноді називають також «катастрофічними». Вони виявляються як несподівані поломки без симптомів руйнування.

Фізична природа таких відмов полягає у раптовій концентрації навантажень, що діють усередині та поза елементом. Такі раптові концентрації навантажень виникають випадково, і випадковість раптових відмов є лише їх наслідком, що безпосередньо спостерігається. Якби ці концентрації навантажень групувалися близько певних значень часу, їх виникнення був би цілком випадковим. Отже, випадковість проявляється в тому, що події відбуваються несподівано і нерегулярно, хоча досить великі і рівні за тривалістю проміжки часу відбувається приблизно однакове число подій.

Коли деяка сукупність елементів працює у умовах довкілля, у яких відбуваються раптові концентрації навантажень, і елементи відмовлятимуть раптово, т. е. випадковим чином. Число відмов, що виникають у рівні часові проміжки, буде приблизно однаковим, якщо число елементів у сукупності підтримується постійним шляхом заміни елементів, що відмовили. Але якщо не замінювати елементи, що відмовили, то число справних елементів буде експоненційно зменшуватися і кількість відмов у періоди рівної тривалості буде також експоненційно зменшуватися. Залишається дедалі менше справних елементів, які можуть відмовити.

Побудуємо криву інтенсивності відмов залежно від часу експлуатації *Т* для великої кількості однотипних елементів. Результуюча інтенсивність відмов графічно показано на мал. 3. У момент *Т*=0 вводиться у дію дуже багато нових елементів одного типу. Ця сукупність елементів спочатку може мати високу інтенсивність відмов, якщо вона містить кілька нестандартних, дефектних зразків. Оскільки ці дефектні елементи відмовляють один за одним, інтенсивність відмов відносно швидко зменшується протягом так званого періоду «доробки», або «випалювання», і стає приблизно постійною величиною на момент *Тд*, коли дефектні деталі вже відмовили.

|  |
| --- |
| Мал.3. Інтенсивність відмов елемента як функція часу експлуатації |

Сукупність елементів, що пройшли період приробітку, має найнижчий рівень інтенсивності відмов, який зберігається приблизно постійним. Відповідний період називається «періодом нормальної експлуатації», оскільки в цей час елементи можуть використовуватися найбільш успішно. Тут експоненційний закон надійності є доброю апроксимацією. Коли час використання елементів досягає значення *Т*зн, починає позначатися знос. З цього моменту інтенсивність відмов починає швидко зростати. Якщо до моменту *Т*зн відмовляє лише невеликий відсоток загальної кількості елементів, то серед елементів, які пропрацювали безвідмовно до часу *Т*зн, близько половини відмовлять за період роботи від *Т*зн до *М*. Час *М* є середнім значенням довговічності елементів з урахуванням зносу. Назвемо його просто *середньою довговічністю* на відміну *середнього напрацювання на відмову* *m*=1/λ протягом періоду нормальної експлуатації. Середня довговічність елементів *М* може змінюватися в межах від кількох годин до кількох десятків тисяч годин. Звичайно, можливі винятки у той та інший бік. Час *Т*зн, до якого інтенсивність відмов може вважатися постійною, природно, меншою від середньої довговічності *М*. Співвідношення між *Т*зн і *М* буде розглянуто в наступних лекціях.

Середнє напрацювання на відмову *m*=1/λ, зазвичай набагато більше, ніж середня довговічність елемента *М*. Якщо протягом періоду нормальної експлуатації інтенсивність раптових відмов мала, то напрацювання на відмову може доходити до сотень тисяч або навіть до мільйонів годин. Природно, що середнє напрацювання на відмову, скажімо, 100000 годин (або інтенсивність відмов 0.00001) ще не означає, що елемент можна використовувати протягом 100000 годин. З лекції 3 випливає, що можливість безвідмовної роботи елемента при середній. напрацювання на відмову 100000 годину складе всього 0.368. Але є інший чинник, який обмежує довговічність елемента. Цей фактор – зношування (див. мал. 3).

Нехай елемент має середню довговічність *М* лише 10000 годин – середню довговічність справді гарної роботи. Такі елементи можуть працювати, скажімо, до *Т*зн=6000 годин, але не більше, якщо бажано запобігти різкому зростанню інтенсивності відмов. Отже, дуже низька інтенсивність відмов, яка дає середнє напрацювання на відмову 100000 годин, існує лише перших 6000 годин експлуатації елемента. Якщо елемент не відмовить до 6000 годин (що дуже ймовірно), необхідно замінити його новим і рівноцінним елементом, якщо бажано продовжувати роботу з високим рівнем надійності *m*=100 000 год.

Що ж тоді означає середнє напрацювання на відмову *m*? Вона просто вказує, наскільки надійним є елемент у період нормальної експлуатації, але ця інформація має вкрай важливе значення. Елемент із середнім напрацюванням на відмову 100000 годин матиме надійність 0.9999 або 99.99% для будь-якого 10-годинного періоду роботи. Далі, якщо включити в роботу 100000 елементів такої ж якості на 1 годину, то очікується лише одна відмова. Аналогічно очікується лише одна відмова, якщо в тих же умовах включити в роботу 10000 елементів на 10 годин, або 1000 елементів на 100 годин, або 100 елементів на 1000 годин. Ці елементи можуть надійно працювати в системах, поки час роботи будь-якого з них не перевищить *Т*зн. Необхідно профілактично замінювати кожен елемент, перш ніж він відмовиться від зносу.

Наприклад, якщо система складається з 100 елементів рівної якості, в ній зрідка виникатимуть раптові відмови, але зносові відмови, які можуть бути причиною значно більших порушень, не з'являться доти, доки виконуватимуться правила профілактичної заміни елементів. Для 100 елементів системи можна в середньому очікувати лише одну відмову за 1000 годин роботи, або 6 відмов за 6000 годин. Це мають бути лише раптові, а не зносові відмови. Зносові відмови попереджаються своєчасною профілактичною заміною.

З іншого боку, раптові відмови, що мають постійну інтенсивність протягом усього періоду нормальної експлуатації, не можуть бути усунені шляхом заміни елементів. Якщо ми спробуємо замінити хороший елемент, що не відмовив, скажімо, після 1000 годин роботи, то цим не буде досягнуто жодного поліпшення. Найімовірніше, цим буде завдано лише шкоди, оскільки використаний заміни елемент не прироблений і присутність таких елементів може лише збільшити інтенсивність відмов. Тому найкраще протягом періоду нормальної експлуатації елементів замінювати їх лише у разі відмови. Однак тут знову необхідно підкреслити, що жоден елемент не повинен залишатися в роботі без заміни над часом *Т*зн, інакше ймовірність відмови елемента істотно зросте, а ймовірність відмови системи зросте ще різкіше. Надійність систем, у яких проводяться своєчасні профілактичні заміни елементів, може значно знизитися.

Золоте правило надійності полягає в наступному: у період нормальної експлуатації елементи повинні замінюватися після відмови та необхідна своєчасна профілактична заміна елемента, навіть якщо він не відмовив у кінці періоду нормальної експлуатації.

З мал. 3 видно, що інтенсивність відмов спочатку, як у роботу вводяться нові елементи чи нові системи, то, можливо дуже високої. Ця висока інтенсивність відмов обумовлюється так званими «приробітковими відмовими». Дефектні елементи відмовляють зазвичай у перші години роботи. Однак, якщо кількість дефектних елементів велике, період припрацювання, або випалювання, може тривати до декількох сотень годин. У цей період зазвичай виникає багато відмов, але після заміни дефектних елементів справними та після усунення інших початкових несправностей інтенсивність відмов відразу знижується до деякої, практично постійної величини. Якщо небажано, щоб приробіткові відмови порушували роботу апаратури в початковий період експлуатації, необхідно відбраковувати елементи протягом часу *Т*п, перш ніж використовувати їх в апаратурі. Таке відбраковування дозволяє відсіяти дефектні елементи, внаслідок чого в апаратурі з'явиться значно менше відмов на початку експлуатації. Процес приробітку абсолютно необхідний для керованих снарядів, ракет та космічних систем, у яких після пуску жоден елемент замінити неможливо, а відмова єдиного елемента може призвести до загибелі системи.

Отже, друге золоте правило надійності полягає в тому, що перед монтажем апаратури необхідно проводити відбраковування елементів, а потім їхнє припрацювання в системі.

# Лекція 6. ЗНОС ТА НАДІЙНІСТЬ

Високу надійність на тривалий період можна отримати за допомогою відповідного приробітку, що дозволяє виключити приробіткові відмови, та за допомогою профілактичної заміни елементів, що усуває зносові відмови. Заміна елемента важлива у тих випадках, коли надійна робота потрібна на час, що перевищує *Т*зн (див. лекція 5, мал. 3).

Подібні заміни відновлюють апаратуру і наводять її у такий стан, коли ймовірність відмови незначна. Таким чином, якщо налагоджено хороше профілактичне обслуговування, надійна робота системи можлива протягом тривалого часу. Система із правильно вибраним періодом профілактики майже ніколи не старіє. Якщо елементам у системі не дозволяють зношуватися, система не відмовиться від зносу. Незважаючи на те, що все ще залишається деяка інтенсивність раптових відмов, система загалом буде дуже надійною.

Висока надійність – це низька інтенсивність відмов і, отже, велике середнє напрацювання на відмову. Як було показано в лекції 3, середнє напрацювання на відмову є дуже зручним параметром для вираження та чисельного розрахунку надійності в період нормальної експлуатації. Якщо середнє напрацювання на відмову апаратури відоме, надійність для заданого періоду роботи можна безпосередньо розрахувати, використовуючи експоненційну формулу. Середнє напрацювання на відмову - це середній час, за який виникає відмова. Так як це лише *середній* час, природно очікувати, що в деяких випадках відмови можуть виникнути значно раніше за середній час. Так само можуть зустрітися і випадки, коли відмова виникне значно пізніше за середній час. Тому не можна вважати, що якщо середнє напрацювання дорівнює т годин, то апаратура буде безвідмовно працювати всі ці *m* годин.

На відміну від нормального розподілу відмов (досить точно описує зносові явища), коли приблизно половина відмов виникає до моменту, що відповідає середньому значенню довговічності елемента, а половина – після цього моменту, при експоненційному розподілі близько 63% відмов виникає раніше моменту часу, відповідного середньої на відмову, і лише приблизно 37% відмов виникає пізніше. Тому надійну роботу можна отримати тільки для інтервалу часу, значно меншого за середнє напрацювання на відмову. Тільки для часу роботи менше *m* ймовірність відмови дійсно мала і, отже, висока ймовірність безвідмовної роботи.

З іншого боку, у разі нормального розподілу відмови групуються близько середнього значення довговічності *М*. Тому безвідмовну роботу часто можна отримати для досить великого часу роботи, близького до середнього значення довговічності елемента, відповідно до величини стандартного відхилення у цьому конкретному випадку.

Для ілюстрації відмінності експоненційного та нормального розподілу на мал. 4 порівнюються функції густини відмов для цих двох розподілів. Криві ілюструють щільність ймовірності, з якою відбуваються відмови у початковій сукупності елементів, коли елементи не замінюються до відмови останнього їх. Функція щільності експонентного розподілу виражається формулою  [відповідно до (4.15)]. У цій формулі *t* - час відмови, що відраховується від будь-якого початкового моменту часу *t*=0, який елемент був виправлений. Отже, експоненційний розподіл не залежить від того, скільки часу елемент вже пропрацював, але, звичайно, це справедливо лише доти, поки не почнеться зношування елемента, тобто протягом усього часу, поки інтенсивність відмов постійна. Коли настає зношування елемента, інтенсивність відмов починає зростати і до раптових відмов додаються зносові, які зазвичай підкоряються нормальному розподілу.

|  |
| --- |
| Мал. 4. Експоненційна та нормальна функції щільності: а – експоненційна функція щільності; б – нормальна функція густини. |

Щільність нормального розподілу дається виразом:

 (6.1)

де *Т* – загальний час експлуатації («вік») елемента, σ – стандартне відхилення. Таким чином, нормальний розподіл залежить від «віку», тоді як експонентний – не залежить.

Мал. 4 показує, що сукупність елементів з експоненційним законом відмов при випробуваннях без заміни елементів, що відмовили, несе найбільші втрати в період до *m*, у той час як сукупність елементів, що відмовляють за нормальним законом, зазнає найбільших втрат під час, близьке до середнього значення *М* довговічності елементів цієї сукупності.

Інтегруванням функцій щільності отримуємо можливість відмови як площа під кривими щільності. Ці можливості відмови показані заштрихованими областями для різних проміжків часу *t*2-*t*1 і *T*2-*T*1. Імовірності визначаються так:

 (6.2)

Величину *Р* називатимемо апріорною ймовірністю відмови для *заданого проміжку часу* від *t*1 до *t*2 або від *T*1 до *T*2.

Загальна площа під кривою щільності, за визначенням, дорівнює 1. Іншими словами, можливість відмови за нескінченно великий проміжок часу дорівнює 100%, тобто ця подія достовірна. Для експоненційного випадку цей результат випливає з того, що:

 (6.3)

Якщо візьмемо інтеграл від *t*=0 до довільного значення *t*, отримаємо *інтегральну можливість відмови* для проміжку часу від 0 до *t*, яку називають ненадійністю:

 (6.4)

Ця залежність, представлена графічно щодо різних значень *t*, дає криву інтегрального розподілу ймовірності, чи криву ненадійності. В експоненційному випадку рівняння кривої ненадійності має вигляд:

 (6.5)

Побудувавши криві інтегральної ймовірності відмови як експоненціального, так нормального розподілів, отримаємо графіки, зображені на мал. 5. Щодо ймовірності безвідмовної роботи *R* для того ж тимчасового інтервалу, то вона дорівнює *R*=1-*Q*, і, отже, криві *R*, або криві ймовірності безвідмовної роботи, для обох розподілів виглядають так, як показано на мал. 6. Ці криві називають також *характеристиками безвідмовності*. В експоненційному випадку для перших годин роботи можливість безвідмовної роботи *R*(*t*) зменшується зі зростанням *t* набагато

|  |
| --- |
| Мал.5. Криві ймовірності відмови:  а – експоненційна; б – нормальна |
| Мал.6. Криві можливості безвідмовної роботи:  а – експоненційна; б – нормальна |

швидше, ніж у разі нормального розподілу *R*(*t*) для рівних відносин *t*/*m* та *Т*/*М*.

Подані графіки не описують будь-яких дійсних випадків. Вони наведені лише для ілюстрації відмінності у поведінці двох характерних типів відмов та їх ймовірностей – раптових відмов, що підпорядковуються експоненційному закону розподілу, та зносових відмов, розподілених приблизно за нормальним законом. Більшість елементів значення *М* набагато менше значень т.

Величина середнього напрацювання на відмову *m* для дуже хороших елементів, що працюють в ідеальних умовах, може досягати. мільйонів годин, тобто з людської точки зору наближається до нескінченності, що означає абсолютну надійність. Але значення *М* для елементів, тобто їхня середня довговічність, зазвичай обмежена декількома тисячами годин або в деяких виняткових випадках - декількома десятками тисяч. Отже, навіть якщо елемент міг би працювати з майже абсолютною надійністю протягом періоду його нормальної експлуатації, ця висока надійність існувала б тільки протягом порівняно короткого періоду експлуатації *Т*зн. Відмова цього елемента неминуче відбудеться - нехай не від випадкового пошкодження, так від зносу, якщо він тільки не буде вилучений із вживання, перш ніж це станеться.

Звичайно, з економічної точки зору виникає питання, яка перевага досягається при заміні елемента до того, як він відмовить, чи не буде економічнішим залишити його в роботі до того, як він дійсно відмовить внаслідок зносу? І тут напевно знадобився б менший запас елементів.

Такий підхід може ввести в оману. Профілактична заміна може бути виконана в періоди, коли система тимчасово не працює, наприклад, протягом регулярного техогляду або запланованої перерви в роботі. Отже, правильна профілактична заміна не призводить до втрат, які були б неминучі при вимушених перервах у роботі, викликаних відмовами елементів. Очевидно, що відмова деяких елементів під час роботи може призвести до величезних втрат, пов'язаних з відмовою всієї системи. Отже, щоразу, коли мають справу з елементами, які можуть спричинити несправність у системі, відмову всієї системи чи людські жертви, профілактична заміна таких елементів є більш доцільною, ніж очікування їх відмови у роботі. Тому профілактична заміна – запорука надійної роботи систем тривалого використання.

Розглянемо впливом геть надійність відсутності своєчасної заміни елементів. Найчастіше зносові явища добре описуються нормальним розподілом. Щільність нормального розподілу надається формулою:

 (6.6)

де *М* – середня довговічність, *Т* – час експлуатації, або загальний час роботи, системи, σ – стандартне відхилення від середньої довговічності *М*, яке визначається за формулою:

 (6.7)

Величина *N* у виразі (6.7) означає кількість подій (відмов або рівнозначних явищ, що відбуваються через час *Т*), які підсумовуються у виразі . Загальна площа під кривою густини *f*(*T*), як показано на мал. 7, дорівнює одиниці. Деяка ділянка площі під цією кривою від *Т*1 до *Т*2 вказує відсоток первісного числа елементів, що відмовили в інтервалі *Т*1-*Т*2. Ця ділянка площі означає також *апріорну* ймовірність того, що деякий елемент первісної сукупності відмовить в інтервалі *Т*1‑*T*2, якщо при включенні його в роботу в момент *Т* = 0 він був новим.

|  |
| --- |
| Мал. 7. Апріорна щільність ймовірності відмови. 7. Апріорна щільність ймовірності відмови |

При інтерпретації апріорної ймовірності потрібно, проте, бути обережним. Наприклад, апріорна ймовірність того, що елемент відмовить у часовому інтервалі від *М*-3σ до *М*-2σ, дорівнює 2.14%, а в інтервалі від *М*+2σ до *М*+3σ вона знову дорівнює 2.14%. Отже, новий елемент, включений в роботу в момент *Т*=0, має ту ж саму ймовірність відмови 2.14% в інтервалі [*М*-3σ, М-2σ], що і в інтервалі [*М*+2σ, *М*+3σ]. В рівній мірі можливо, що він або гірший, або кращий за певний типовий (середній) елемент. Однак ці дві ймовірності, що дорівнює 2.14%, не рівнозначні з точки зору надійності, тобто ймовірності безвідмовної роботи елемента. У першому випадку елемент має можливість безвідмовної роботи в інтервалі від *Т*=0, коли він був новим, до *Т*=*М*-Зσ (тобто моменту, коли починається інтервал [*М-*3σ, *М-*2σ]), рівну 99.865% , у другому випадку він має ймовірність безвідмовної роботи в інтервалі від *Т*=0 до *Т*=*М*+2σ, рівну тільки 2.275%.

Таким чином, 2.14% ймовірність відмови в кожному з двох тимчасових інтервалів повинна бути додана до ймовірності безвідмовної роботи до початку тимчасового інтервалу. Стверджуючи, що елемент має можливість відмови лише 2.14% в інтервалі від *М*+2σ до *М*+3σ, ми ще не отримуємо надійності, поки не додамо, що можливість відмови до моменту *М*+2σ дорівнює 100-2.275=97.725%. Тому, сумнівно, чи пропрацює елемент до моменту *М*+2σ. Імовірність відмови у 2.14% – це лише апріорна ймовірність, яку потрібно додати до ймовірності відмови від моменту *Т*=0 до моменту, коли починається інтервал.

Таким чином, у другому випадку ми маємо повну ймовірність відмови, що дорівнює 97.725+2.14=99.865%. Це інтегральна можливість відмови елемента в інтервалі від *Т*=0 до *Т*=*М*+3σ. Отже, елемент має можливість безвідмовної роботи від *Т*=0 до *Т*=*М*+3σ тільки на 100 – 99.865 =0.135%, тоді як у першому випадку він має можливість відмови до *М-*2σ, рівну 0.135+2.14=2.275% , і, отже, ймовірність безвідмовної роботи від *Т*=0 до *Т*=*М*-2σ, рівну 100-2.275=97.725%.

Для точної оцінки можливості елемента безвідмовно працювати до моменту *Т* потрібно використовувати інтегральну ймовірність. Вона може бути визначена за таблицями нормального розподілу ймовірностей. (це питання розглянуто в матеріалах для СРС до лекції 6)

# Лекція 7. СПІЛЬНА ДІЯ РАПЛИВНИХ І ЗНОСОВИХ ВІДМОВ

Спільну ймовірність безвідмовної роботи елемента з урахуванням раптових та зносових відмов у період від *Т*=0, коли елемент новий, до часу *Т* можна отримати з формули [СРС, (6.16)]:

 (7.1 а)

Оскільки  за припущенням одно одиниці. У цій формулі:

 (7.1 б)

де *Т* – напрацювання елемента, а *М* – середнє його довговічності.

На мал.8 наведена крива *R*(*Т*) при *m* > *М*, а на мал.9 – та сама крива для М > *m*. Крива надійності виходить множенням ймовірності безвідмовної роботи з урахуванням лише раптових відмов () на ймовірність безвідмовної роботи з урахуванням зносу (*R*зн).

|  |  |
| --- | --- |
| Мал.8. Крива надійність для *m* > *M* | Мал.9. Крива надійність *M* > *m* |

З наведених графіків випливає, що до напрацювання *Т*1 функція надійності співпадає з експонентною. Пізніше починають переважати зносові відмови, і крива, що враховує спільні впливи раптових та зносових відмов, різко зменшується.

Формулу (7.1а) можна використовувати тільки *Т*=0, коли елемент новий. Якщо елемент має якийсь напрацювання *Т*0, то, використовуючи [СРС, (6.16)], знаходимо:

 (7.2)

Значення ймовірності дорівнює 1 для *t* = 0, тобто на початку розглянутого проміжку роботи. На мал. 10 відтворено криву мал. 8 при обліку початкового доробку *Т*0 за формулою (7.2).

|  |
| --- |
| Мал. 10. Надійність елемента, що експлуатувався протягом часу *Т*0 |

Спочатку, коли елемент новий (*Т*=0), крива у нашому принаймні, що враховує спільний вплив раптових та зносових відмов, збігається з експоненціальною аж до 0.4 *М* годин. Після того як напрацювання досягає 0.4 *М* крива спільного впливу (див. мал.10) слід експоненціальною тільки на невеликій ділянці за *Т*0, а потім швидко зменшується після *t*=*T*2, тобто коли напрацювання елемента стають більшими за *Т*0+*Т*2. Пунктиром зображений початковий графік кривої спільного впливу раптових та зносових відмов порівняно з експоненційною кривою.

З графіків випливає, що, у той час як значення т середнього напрацювання на відмову залишається без зміни, величина *М* (середнього значення довговічності) у новій системі координат, що враховує напрацювання елемента, перемістилася набагато ближче до початку відліку. Очевидно, що після того, як напрацювання елемента перевищить значення *Т*0+*Т*2, відмови елемента більше не підпорядковуватимуться експоненційному закону, і елемент стане надзвичайно ненадійним.

Така зміна – перехід від експоненційного закону відмови до закону, характерного для періоду зношування, – відбувається у разі одного елемента при напрацюванні від *М-*3.5 σ до *М-*3σ. Для напрацювань *М-*4σ і менша ймовірність зносової відмови одного елемента незначна. Але коли велика кількість елементів працює послідовно, навіть ці малі ймовірності зносових відмов окремих елементів у сукупності дають дуже відчутні величини. Аналогічна ситуація була розглянута в лекції 6 де результуюча надійність системи описувалася формулою [СРС, (6.17)]:



Значення *Т*і представляють тут напрацювання різних елементів системи.

(детальніше це питання розглянуто в матеріалах для СРС до лекції 7)

# Лекція 8. ПРИРОБНІ ВІДМОВИ І ДОВГОВІЧНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ

Роль статистичних методів у поєднанні з розрахунками ймовірностей раптових та зносових відмов для оцінки надійності елементів та систем мала стати очевидною з попередніх розділів. Дійсно, імовірнісний підхід є єдиним можливим підходом до проблеми надійності, коли апаратура повинна працювати при високих навантаженнях у важких навколишніх умовах, якщо суттєві обмеження не дозволяють використовувати фактори, що забезпечують високу безвідмовність.

Загалом можна сказати, що експоненційний і нормальний розподіл відмов є хорошими математичними моделями в задачах надійності.

Експонентний розподіл достатньо для оцінки надійності у наступних двох крайніх випадках:

1) коли знос систематично запобігає шляхом заміни елементів до закінчення періоду нормальної експлуатації;

2) коли допускається знос елементів і замінюються лише елементи, що відмовили.

Майже всі оцінки надійності, пов'язані з розрахунками ймовірності успішного завершення цієї операції, входять у ці дві категорії. У першому випадку надійності на кілька порядків вищі, ніж у другому. У той час як другий випадок при постійній інтенсивності відмов є строго експонентним, у першому випадку вивчення зносу пов'язане з визначенням найкращого часу профілактичної заміни кожного елемента. Крім того, другий випадок відноситься тільки до апаратури, що тривало працює, яка підлягає поточному експлуатаційному ремонту в період її роботи, а перший випадок відноситься як до апаратури одноразового, так і до апаратури багаторазового використання, а саме:

а) до апаратури багаторазового використання, коли для роботи потрібна висока надійність і профілактичне обслуговування є практикою;

6) до апаратури одноразового використання, робочий період якої настільки короткий, що жоден елемент не може зноситися, і тому ймовірністю зношування великої кількості елементів можна знехтувати.

Це можна зробити, якщо відомі характеристики зносу елементів. Отже, програма надійності не може бути повною, якщо в ній не враховуються зносові закономірності і якщо вона заснована лише на даних про раптові відмови. Вивчення зносу є абсолютно необхідним для встановлення режиму профілактичного обслуговування (для апаратури багаторазового використання) або для гарантії того, що явище поступового зносу не може вплинути на систему під час її роботи (для апаратури одноразового використання).

Крім раптових і зносових відмов, існують ще приробіткові відмови, які також можуть шкідливо впливати на надійність системи. Імовірнісна оцінка цього типу відмови є менш важливою, ніж оцінка раптових та поступових відмов. Зазвичай приробіткові відмови усуваються протягом перших 20-200 годин роботи елемента або системи за допомогою систематичного відбраковування або приробітку, і вони не повинні впливати на надійність, коли приробіток закінчена і система вступить до нормальної роботи. Час усунення приработочных відмов визначається досвідченістю інженерів. Але для повного уявлення про проблему звернемося ще раз до обговорення явища приробіткових відмов.

Раніше зазначалося, що раптові відмови визначаються як відмови, викликані непередбаченими раптовими концентраціями зовнішніх навантажень та внутрішніх напруг, що перевищують розрахункові. Несподівані концентрації навантажень є неминучими в обладнанні. Такі концентрації виникають у довільні моменти часу, вони можуть мати різні амплітуди, стати комбінацією різних навантажень і виникати в різних місцях апаратури.

Елемент відмовляє, коли сумарні чи індивідуальні навантаження перевершують його міцність. Якщо групі елементів є кілька дефектних, нестандартних зразків, вони відмовлятимуть при нижчих рівнях навантаження, ніж інші. Природа виникнення приробіткових відмов носить такий самий випадковий характер, як і раптових відмов, але випадки малих концентрацій навантажень зустрічаються тут набагато частіше, ніж великих. Тому дефектні зразки, як правило, мають більш високу інтенсивність відмов (або нижчий середній напрацювання на відмову), ніж хороші стандартні зразки.

Дефектні елементи зазвичай мають свою власну дуже високу інтенсивність відмов, яка, однак, є постійною внаслідок випадкової природи виникнення відмов. Тому відмови дефектних елементів розподіляються експоненційно із середнім напрацюванням на відмову, у кілька разів меншою, ніж в інших елементів. Дефектні елементи у великих сукупностях стандартних елементів відмовляють експоненційно та дуже швидко, а після відмови замінюються стандартними елементами. Тому немає достовірних даних щодо дефектних зразків, їх дійсного впливу на надійність і щільність ймовірності їх відмов. Це узгоджується з визначенням надійності  великої групи елементів, де *Nx* – число елементів із загальної первісної кількості *N*, які відмовили під час роботи *t*. Очевидно, що якщо *N* елементів у системі з'єднані послідовно і один або кілька їх дефектні, то надійність системи майже повністю визначається високою ймовірністю відмови цих декількох елементів. Система буде ненадійною, доки не будуть видалені ці дефектні елементи.

Коли дефектні елементи є на початку роботи, надійність системи дуже низька, але як тільки дефектні елементи, що відмовили, замінені хорошими, вона швидко збільшується.

Для дослідження впливу дефектних елементів на надійність системи припустимо, що система складається з *N* елементів, у тому числі *N*д дефектними, і нехай *N*д <<*N*. Будемо вважати, що хороші елементи мають 100%-ної надійністю, тоді як дефектні елементи мають дуже низький середній напрацювання на відмову (*m*д). Імовірність відмови дефектного елемента тоді дорівнює , а ймовірність відмови хоча б однієї з *N*д дефектних елементів, з'єднаних послідовно, . Отже, хороші елементи забезпечують надійність 100%, а надійність усієї системи з *N* послідовних елементів, серед яких *N*д дефектних, дорівнює:

 (8.1)

Таким чином, надійність системи, коли вона введена в роботу, повністю визначається ненадійністю дефектних елементів. Так як напрацювання на відмову цих елементів є зазвичай дуже низьким, від декількох хвилин до декількох десятків годин, система при цьому виявляється дуже ненадійною. Відмова ненадійних елементів *N*д відбувається експоненційно, у той час як *N* залишається постійним, тому що дефектні елементи, що відмовили, замінюються хорошими. Тому надійність системи покращується з кожною заміною. Після першої відмови та її усунення надійність системи стає рівною , після другої відмови  і т. д. Але поки що хоча б один дефектний елемент залишається в системі, її надійність не може бути кращою, ніж надійність цього єдиного елемента, яка дорівнює .

Оскільки *m*д невелика, система залишається вкрай ненадійною. Однак, як тільки останній дефектний елемент відмовляє і замінюється новим, хорошим, надійність системи одразу підвищується до 100%, так як за припущенням, для хороших елементів інтенсивність відмов дорівнює нулю. Наприклад, якщо 10 елементів у системі дефектні і в кожного дефектного елемента *m*д =10 годин, то надійність системи (до першої відмови) дорівнюватиме *R*=*e*-*t*=0.368 для однієї години роботи і *R*=*e*-10=0.0000454 для 10 годин роботи. Після дев'ятої відмови, коли тільки один дефектний елемент залишається в системі, надійність системи дорівнює *R*=0.9 для однієї години роботи і *R*=0.368 для 10 годин. Але як тільки останній дефектний елемент відмовляє і замінюється, надійність системи стає рівною *R*=1 для 10 годин, а також протягом будь-якого іншого періоду роботи, якщо прийнято, що всі елементи абсолютно надійні. Приробіток системи повинен, таким чином, полягати в роботі системи в умовах, подібних або жорсткіших, ніж ті, які будуть переважати при реальній роботі, щоб викликати відмову дефектного елемента і замінити його доброякісним.

У процесі приробітку зазвичай цікавляться тривалістю приробітку: скільки часу необхідно витратити для того, щоб система досягла надійності, що відповідає її нормальній роботі. Якщо спочатку в системі є *N*д дефектних елементів, скільки часу проходить перш, ніж вони відмовлять? Це завдання може бути вирішена, якщо відоме середнє напрацювання на відмову кожного з цих *N*д елементів. Очевидно, що якщо середнє напрацювання на відмову одного елемента дорівнює *m*д, то середній час до відмови всіх *N*д елементів буде:

 (8.2)

Виведення цієї формули буде дано в лекції 11. Узагальнення формули для *Т*п на випадок, коли середні напрацювання на відмову елементів не однакові, наводиться у тому ж розділі. Величину *Т*п можна назвати *середнім часом приробітку*. Для 10 дефектних зразків при *m*д=10 годин, як це було раніше згадуваному прикладі, середній час для припрацювання системи відповідно (8.2) дорівнює приблизно *Т*п =3*m*д, або 30 годин. Якби дефектних елементів було 100, очікуваний час було близько *Т*п =5,5*m*д, або 55 годин. Важливо наголосити, що *Т*п – це лише середній час, який відповідає експоненційному закону відмов. Це означає, що тільки близько 63 зі 100 таких систем могли б бути припрацьовані за час *Т*п. Інакше висловлюючись, загалом у системі буде точно 63% потенційних приработочных відмов, які у період часу від *t*=0 до *t*= *Т*п. Тому надійність якоїсь однієї системи протягом часу *Т*п все ще дуже низька, приблизно *R*=0.67 для години роботи і *R*=0.045 для 10 годин роботи. Таким чином, щоб досягти високої надійності системи, дійсний час приробітку слід збільшити принаймні в 5 разів.

Якщо відомо, що приробіткові відмови розподілені експоненційно, це дозволяє зробити висновок про дійсний час припрацювання системи, заснований на спостереженнях над часом декількох перших приробіткових відмов, які відбуваються в процесі приробітку.

Висновки, зроблені вище про приробіткові відмови, ґрунтувалися на трьох припущеннях: 1) окремі дефектні елементи знаходяться в одній партії з хорошими елементами; 2) для заміни дефектних елементів, що відмовили, використовуються тільки хороші елементи; 3) інтенсивність відмов хороших елементів дорівнює нулю.

(Докладніше ці припущення розглянуті в матеріалах для СРС до лекції 8).

# Лекція 9. ЕКСПОНЕНЦІЙНЕ І ПУАССОНІВСЬКЕ РОЗПОДІЛУ

Виразне розуміння таких явищ, як відмови в період опрацювання і в період зносу, розглянуті в лекціях 6-8, дуже важливе для розрахунків надійності. Відмови як у період приробітку, так і в період зношування є небезпечними ворогами надійності системи.

Якщо передчасно приступити до експлуатації системи, в якій не усунуті всі можливості прояву відмов, така система майже безумовно відмовить незабаром після початку роботи. Це може статися як за кілька секунд чи хвилин, і через кілька годин. Для системи, що складається з послідовно з'єднаних елементів, така відмова може виявитися катастрофічною. Без належного приробітку надійність системи буде низькою, тому що вона майже повністю визначається дефектними елементами або іншими можливими приробітковими відмовими, поки зберігається можливість хоча б одного з них.

У лекції 8 було показано, як неякісний ремонт впливає на надійність системи в період її нормальної експлуатації. Неякісний ремонт запроваджує приробіткові відмови в період експлуатації, що посилює інтенсивність відмов системи. Можливо, що без цих приробіткових відмов, що постійно вводяться, надійність системи була б близькою до 100%. Там, де надійність справді відіграє велику роль, важко переоцінити значення ретельного припрацювання апаратури, використання для заміни лише тих деталей, які самі пройшли процес відбраковування чи «випалювання», та застосування спеціальних методів якісного ремонту.

Використання таких заходів пов'язані з меншими витратами, ніж рекламації, вимушений ремонт апаратури у віддалених районах і навіть просто втрата репутації. Необхідні заходи щодо приробітку та методи якісного ремонту з використанням стандартних елементів передбачають попереднє випробування, перевірку, тренування елементів та, нарешті, інженерний висновок, заснований на вмінні проводити статистичні та ймовірні розрахунки.

Іншим великим ворогом надійності є зношування. Попередні випробування та перевірки в цьому випадку неефективні, тому що вони не допомагають позбутися зносових відмов. Для успішної боротьби з зносом потрібні точні відомості про зносові характеристики всіх елементів і про розподіл зносових відмов, а для визначення спільного впливу зносу входять до системи численних елементів потрібні ймовірні розрахунки. У лекції 6 показано, як навіть при дуже малих ймовірностях зношування окремих елементів система, що складається з багатьох елементів, може мати дуже високу ймовірність відмови. Але зношування можна запобігти за допомогою періодичних замін. Час заміни елементів у системі, як показано, може бути розрахований із залученням імовірнісних методів. Чим складніша система, тим раніше має бути проведена профілактична заміна елементів. Якщо цього не зробити, надійність системи стане малою, а вартість експлуатації весь час залишатиметься великою.

Якщо не виробляти приробітку та профілактики зносових відмов, складні системи можуть почати відмовляти через знос елементів навіть раніше закінчення періоду приробітку. Ми стикаємося тут з тим, що за відсутності систематичних заходів щодо відбракування елементів приробітні відмови щоразу вводяться заново (при відновленні). У таких системах ще до того, як їх інтенсивність відмов стабілізується на високому постійному рівні, настає період, коли до приробіткових відмов, кількість яких експоненційно зменшується, додаються раптові відмови, що виникають з постійною інтенсивністю, і розподілені за нормальним або логарифмічно-нормальним законом зносових відмов. Це може призвести до такого незвичайного розподілу щільностей відмов, що навіть досвідчений статистик зустріне труднощі щодо закону розподілу, що найбільш точно описує такий особливий випадок.

Всі зусилля, витрачені на припрацювання та попередження зносу, переслідують одну мету, яка в той же час є метою всієї техніки надійності: забезпечити такі умови роботи системи, за яких можуть виникати лише раптові відмови, та за допомогою спеціальних методів проектування зменшити їх до абсолютного мінімуму . Поведінка системи точно описуватиметься експоненційним законом, коли відмови виникають випадково, т. е. через раптових і не піддаються передбаченню різних накопичуючих впливів, перевищують проектовані запаси міцності і експлуатаційні допуски для деталей і елементів, що входять у систему. Необхідною умовою для цього є те, що під час роботи по можливості усуваються як приробіткові, так і зносові відмови. Тоді умови, що забезпечують наявність лише раптових відмов з експоненційним розподілом (коли надійність можна підвищувати спеціальними методами, що розглядаються в наступних лекціях), можуть підтримуватись практично необмежено довго за допомогою відповідних заходів з обслуговування.

Щоб краще зрозуміти і зуміти вміло застосовувати викладені в наступних лекціях методи забезпечення надійності, які є «площею і кров'ю» теорії та практики надійності, спочатку коротко розглянемо експоненційний закон розподілу, виведений відомим французьким математиком Пуассоном. Цей закон займає особливе, визначне місце у розрахунках надійності, оскільки він однаково добре визначає поведінка як елементів, і систем у період нормальної експлуатації, т. е. коли інтенсивність відмов вони приблизно постоянна. Великою його перевагою перед будь-яким іншим розподілом є те, що єдиний параметр λ (або зворотний йому параметр *m*) повністю визначає експоненційний розподіл.

Ще одна перевага експоненційного закону полягає у його незалежності від напрацювання (віку) елемента або системи весь час, доки інтенсивність відмов зберігається постійною. Як було показано в лекції 7, системи, що складаються з великої кількості елементів, що ремонтуються після відмов або піддаються регулярній профілактиці, завжди мають постійну інтенсивність відмов протягом досить тривалого періоду спостереження. Це саме собою вже є достатньою основою тієї домінуючої ролі, яку у техніці надійності грає закон експоненційного розподілу.

Щільність експоненційного розподілу має вигляд:

 (9.1)

Де λ - постійна інтенсивність відмов. Легко бачити, що ця функція однозначна і повністю визначається коли відомо значення єдиного параметра λ. Завдяки цьому випробування на надійність апаратури з експоненційним розподілом відмов стає порівняно простим, оскільки все, що необхідно зробити під час випробувань, це визначити значення λ. Інші розподіли зазвичай містять більше одного параметра. Наприклад, нормальний (гаусовий) розподіл має два параметри *М* і σ, логарифмічно-нормальний розподіл має три параметри *М*, *а*, σ тощо. .

У попередніх лекціях зазначалося, що у випадку для отримання безумовної ймовірності відмови, чи ненадійності *Q*, потрібно проінтегрувати щільність розподілу. У разі експонентного розподілу це призводить до формули:

 (9.2)

яка виражає можливість відмови за інтервал часу *t*.

Як було показано раніше, у разі експоненційного розподілу ця ймовірність не залежить від напрацювання обладнання, оскільки значення безумовної та умовної ймовірностей для однакових проміжків часу збігаються.

Так як ймовірність відмови *Q* (ненадійність) і ймовірність безвідмовної роботи *R* (надійність) в один і той же період роботи *t* є ймовірністю двох несумісних подій (відмова та відсутність відмов), то:



Отже, надійність при експонентному розподілі відмов виражається у вигляді:

 (9.3)

Так як ця формула не залежить від часу експлуатації апаратури, надійність апаратури для будь-якого часу роботи *t* за певної інтенсивності відмов можна безпосередньо розрахувати за формулою (9.3). Час роботи *t* може бути будь-яким за єдиної умови, що інтенсивність відмов не змінюватиметься за цей час; у своїй попередній час експлуатації апаратури немає значепия. Для окремого елемента це означає, що його міцність не повинна змінюватися і що він повинен працювати в одних і тих самих умовах навколишнього середовища.

Якщо під час роботи вплив навколишнього середовища змінюється від одного постійного рівня до іншого, а міцність елемента залишається незмінною, елемент матиме постійну інтенсивність відмов  для часу роботи  при першому рівні впливу та постійну інтенсивність відмов  для часу роботи  при другому рівні впливу. Для сумарного часу роботи  надійність елемента виразиться у формі:

 (9.4)

Аналогічні міркування відносяться і до багатоелементних систем.

Функція щільності експоненційного розподілу, як і інших розподілів, характеризується деякою величиною, званої *математичним очікуванням* чи *середнім значенням*. Для будь-якого розподілу цю величину, яку називають першим моментом, можна отримати інтегруванням добуток  по всій області визначення *f*(*t*). Якщо цю операцію зробити над функцією щільності експоненційного розподілу, ми отримаємо середнє значення, яке називають *середнім напрацюванням на відмову*:

 (9.5)

Таким чином, тільки у разі експоненційного розподілу середнє напрацювання на відмову (середнє значення) дорівнює зворотній величині інтенсивності відмов λ.

Інші, не експоненційні функції густин також мають середнє значення, наприклад, середнє значення довговічності *М* для нормального розподілу. У цих випадках, однак, середнє значення не є величиною, оберненою інтенсивністю відмов λ. Незважаючи на те, що для нормального розподілу величина *М* постійна, інтенсивність відмов у цьому випадку не постійна, а є функцією часу, що вже було показано (див. СРС до лекції 6, рис. 1).

Середнє значення можна в загальному випадку отримати інтегруванням функції надійності *R*(*t*) по всій області визначення. Величина m чисельно дорівнює площі під кривою надійності не більше від *t*=0 до *t*=∞. В експонентному випадку:

 (9.6)

що збігається з формулою (9.5).

Це доводиться в такий спосіб. Маємо:



Інтегруючи частинами, отримуємо:



однак у всіх випадках, що практично зустрічаються, перший член  звертається в нуль.

Після того, як доведено, що *λ*=1/*m*, у формулах (9.1) – (9.3) можна замінити λ на 1/*m*:

 (9.7)

 (9.8)

 (9.9)

При експонентному розподілі твір надійностей зводиться до підсумовування показників. Наприклад, якщо надійність одного елемента:



а іншого



той добуток надійностей дорівнює:

 (9.10)

Це добуток надійностей є не що інше, як ймовірність того, що жоден з елементів не відмовить за час *t*. Те ж правило множення застосовно для будь-якого числа незалежно відмовляючих елементів, коли потрібно знайти ймовірність того, що жоден з них не відмовить протягом заданого часу роботи *t*. Як було показано (9.4), це правило застосовно і до двох різних проміжків часу. Надійність *R*(*t*) в (9.4) дорівнює ймовірності того, що елемент не відповідає ні за один з двох проміжків часу  і  . Якщо інтенсивність відмови елемента постійна у часі, то надійність за весь час роботи  дорівнюватиме:



У тих випадках, коли інтенсивність відмов змінюється в залежності від рівня впливу навколишнього середовища, передбачається, що міцність елемента вже досягла значення, яке залишається постійно постійним, і закономірності відмов елемента підпорядковуються експоненційному закону, причому інтенсивність відмов змінюється тільки зі зміною рівня впливів, залишаючись постійної при кожному фіксованому рівні. Якщо рівень впливу повертається до будь-якого попереднього значення, інтенсивність відмов також повертається до відповідної цього рівня величини, якщо міцність елемента збереглася незмінною.

# Лекція 10. НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ НАСЛІДНО СПОЛУЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Насправді недостатньо знати надійності окремих елементів. Цікавим є розрахунок надійності цілих систем – як простих, так і надзвичайно складних, щоб використовувати ці розрахунки для проектування надійних систем або отримати обґрунтовані гарантії того, що проектована система задовольнятиме певним вимогам щодо надійності. Щоб зробити такі розрахунки, необхідно знати надійності окремих частин системи (відомі заздалегідь чи отримані під час випробувань). Отже, визначення надійності системи потрібно знати надійності тих елементів, відмови яких призводять до відмови системи.

Надійність елементів визначається із випробувань, які дають інформацію про інтенсивність відмов. Коли проектується та створюється новий елемент, жодними вимірами – механічними, електричними, хімічними чи структурними не можна визначити значення інтенсивності відмов елемента. Можна передбачити, якою буде електрична, теплова або механічна міцність знову розробленого елемента. Відомо також, що чим міцніший елемент, тим меншою інтенсивністю відмов він матиме. Але дійсну інтенсивність відмов можна знайти лише шляхом збирання статистики, отриманої при випробуваннях на надійність. Дійсна інтенсивність відмов, що визначає ймовірність безвідмовної роботи, залежить від випадкових факторів, що діють у процесі виробництва, та від випадкових змін умов експлуатації елемента. Дійсна інтенсивність відмов залежить від співвідношення між міцністю, що закладається в елемент при проектуванні, і різноманітними умовами довкілля. При випробуваннях на надійність визначається дійсна інтенсивність відмов, тобто можливість відмов для даного комплексу умов навколишнього середовища та навантажувальних умов роботи.

Таким чином, розрахунки надійності систем засновані на двох важливих операціях: 1) на вимірах з максимально можливою точністю надійності елементів, що використовуються в умовах роботи системи; 2) на розрахунках надійності різних комбінацій цих елементів.

Довгі випробування дають більше інформації про дійсну надійність елемента. Розрахунок надійності системи проводиться за допомогою кількох порівняно простих і точних теорем теорії ймовірностей. Хоча часто трапляється, що комплекс умов, за яких елемент працює в системі, відмінний від умов випробувань, за яких визначається інтенсивність відмов елемента, існують методи (що розглядаються нижче), що дозволяють встановлювати вплив навколишніх умов системи на інтенсивність відмов елемента. Можна також перевірити елемент на надійність у системі або її моделі. Але після того як отримані правильні кількісні характеристики надійності елемента в системі або хоча б хороші оцінки цих характеристик, можна точно розрахувати надійність усієї системи, навіть коли система є найбільш складною мислимою комбінацією елементів. Ступінь точності наших результатів не залежить від апарату теорії ймовірностей, тому що ймовірні співвідношення самі по собі абсолютно точні. Вона залежить в основному від точності даних щодо надійності окремих елементів.

У розрахунках надійності системи використовуються такі основні правила теорії ймовірностей:

1) Якщо *А* і *В* – дві незалежні події, ймовірності яких *Р*(*А*) та *Р*(*В*), то ймовірність того, що мають місце обидві події, дорівнює добутку:

 (10.1)

2) Якщо достатньо, щоб із двох сумісних подій сталося хоча б одне – або *А* або *В* – або обидва разом, то:

 (10.2)

3) Якщо події несумісні, тобто коли відбувається одне, інше не може статися, формула (10.2) спрощується:

 (10.3)

4) Якщо дві події не тільки несумісні, а й протилежні, тобто коли не відбувається *А*, відбувається  і навпаки, з (10.3) отримуємо:

 (10.4)

Припускаючи відмови незалежними елементів, отримуємо наступні основні формули для розрахунків надійності комбінації з двох і більше елементів:

1) Якщо *R*1 – надійність одного елемента, а *R*2 – надійність іншого елемента, то ймовірність того, що обидва елементи працюватимуть безвідмовно протягом заданого часу *t* дорівнює:

 (10.5)

де λ1 і λ2 – інтенсивність відмов елементів, які можуть бути постійними або змінними в часі;

2) Імовірність того, що один або обидва елементи відмовить, дорівнює:

 (10.6)

3) Імовірність того, що працюватимуть один або два елементи, дорівнює:

 (10.7)

4) Імовірність, що відмовлять обидва елементи, дорівнює:

 (10.8)

Випадки 1 і 2 – протилежні події, тобто *R*посл+*Q*посл=1, оскільки протилежна подія для безвідмовної роботи двох елементів здійснюється трьома шляхами: або відмовляє один елемент або інший, або обидва разом. Отже, величини *R*посл і *Q*посл можна відповідно назвати *надійністю і ненадійністю послідовного з'єднання елементів, або послідовної системи*. Це означає, що відмова будь-якого елемента призводить до відмови системи.

Випадки 3 і 4 - також протилежні події, тобто *R*парл + *Q*парл = 1, так як протилежна подія для двох елементів, що відмовили, є подія, коли один або обидва елементи працюють безвідмовно. *R*парл і *Q*парл називаються відповідно *надійністю і ненадійністю паралельного з'єднання елементів або системи з навантаженим резервом*. Це означає, що якщо відмовив один елемент, існує інший елемент, який виконує необхідну функцію, і, отже, така паралельна система з двох елементів не відмовляє, якщо відмовив один елемент. Очевидно, що якщо є більше двох елементів, включених паралельно, наприклад, *п* елементів, система не відмовить до тих пір, поки працює хоча б один елемент. Отже, з паралельних елементів допускається відмова n-1 елемента, і це не призводить до відмови системи за умови, що один елемент, що залишився, задовільно виконує необхідну функцію.

Наведена вище формула використовується як при експонентному, так і при неекспонентному розподілі відмов елемента. При розгляді елементів з неекспоненціальним розподілом відмов необхідно враховувати, що інтенсивності їх відмов не є постійними, а є функцією напрацювання *Т* цих елементів. Тому, як було роз'яснено в попередніх розділах, для заданого часу, для якого визначається надійність, необхідно використовувати інтенсивність відмов елемента, що відповідає його напрацюванню до цього часу.

Найчастіше закономірності відмов елементів у системі вдається досить точно описати експоненційної функцією; це завжди можливо, якщо моменти виникнення відмов, відкладаються на шкалі сумарного напрацювання системи або коли елементи працюють лише протягом свого періоду нормальної експлуатації (тобто проводиться профілактична заміна). В експонентному випадку, коли інтенсивність відмов постійна, формули (10.5) – (10.8) спрощуються:

 (10.9)

 (10.10)

 (10.11)

 (10.12)

Складні системи зазвичай складаються з більшого числа елементів або блоків, послідовно з'єднаних, що означає, що система відмовляє при відмові будь-якого елемента або блоку. У деяких випадках до свідомо малонадійних елементів системи підвищення надійності підключаються резервні елементи; іноді до цілих груп елементів підключаються такі ж або подібні групи, що включаються паралельно. Такі паралельні з'єднання двох або більше елементів або груп елементів можна розглядати як блоки, з'єднані послідовно, тобто система відмовляє, якщо відмовляє такий блок в цілому. Для *n* елементів або блоків, з'єднаних послідовно, надійність системи виражається формулою:

 (10.13)

де *R*i - надійність i-го елемента або блоку у послідовному з'єднанні. Тут надійність *R*i може бути як експонентною, так і неекспонентною функцією часу. Якщо це надійність окремого елемента, зазвичай вона експоненціальна, тоді як надійність блоку з резервними елементами нічого очікувати експоненційної функцією, оскільки інтенсивність відмов такого блоку, як буде показано, не постійна.

Формула (10.13) використовується у всіх випадках і, отже, є фундаментальною формулою розрахунку надійності складних систем. Ця формула називається законом добутку надійностей.

Коли всі надійності в системі вимірюються за експонентним законом, формула (10.13), що визначає надійність системи, спрощується і набуває вигляду:

 (10.14)

Таким чином, все, що потрібно зробити, - це скласти постійні інтенсивності відмов всіх послідовно з'єднаних елементів (у масштабі часу роботи системи та в заданих для системи навколишніх умовах), помножити цю суму на задане значення інтервалу часу *t* і знайти значення *R*посл.

# Лекція 11. НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ ПРИ ПОСТОЯНОМУ РЕЗЕРВУВАННІ (НАГРУДЖЕНИЙ РЕЗЕРВ)

Коли потрібно спроектувати систему із заданою надійністю, недостатньо, щоб конструктор просто зменшив кількість елементів і навантаження, що діє на них. Він повинен на всіх стадіях проектування проводити розрахунок надійності, щоб бути впевненим, що необхідна величина надійності забезпечується. Якщо задана дуже висока надійність, доводиться дублювати елементи та ланцюги, щоб задовольнити поставлені вимоги. Іншими словами, необхідно використати *резервування*.

Розрахунок надійності системи при постійному резервуванні заснований на формулах (10.7) та (10.8), які визначають надійність двох елементів, з'єднаних паралельно. В експоненційному випадку вони зводяться до формул (10.11) та (10.12).

Однак часто паралельно працюють більше двох елементів. Тому необхідно узагальнити зазначені формули. Сформулюємо правило для обчислення ймовірності того, що з трьох подій *А*, *В*, *С*, що мають ймовірності *Р*(*А*), *Р*(*В*) і *Р*(*С*), виконуються або *А* або *В* або *С* або будь-яка комбінація цих трьох подій . Це правило записується у вигляді:

 (11.1)

Якщо три події мають однакову ймовірність, тобто:



то

 (11.2)

Подібні формули існують для чотирьох і більше подій.

Використовуючи (11.1) для випадку трьох постійно включених елементів, обчислюємо надійність цього паралельного з'єднання як ймовірність того, що хоча б один із трьох елементів буде справним. Якщо інтенсивності відмов цих елементів постійні і дорівнюють λ1, λ2, λ3, то надійність визначається як:

 (11.3)

Тут індекс нг означає "навантажений резерв". Якщо всі три елементи мають однакову інтенсивність відмов λ, то:

 (11.4)

Аналогічним чином можна знайти формули надійності для випадку чотирьох паралельних елементів, але це досить стомлююча процедура. Існує простіший спосіб підрахунку надійності паралельно працюючих елементів. Використовуючи формулу *R*+*Q*=1, обчислюємо ненадійність *Q*, потім, віднімаючи її з 1, отримуємо величину надійності. З формул (10.8) та (10.12) випливає, що ймовірність відмови двох елементів *Q*=*Q*1*Q*2. Імовірність відмови трьох паралельно працюючих елементів дорівнює *Q*=*Q*1*Q*2*Q*3 а ненадійність *п* паралельних елементів:

 (11.5)

Тоді надійність *п* працюючих паралельно елементів виражається у вигляді:

 (11.6)

Метод попереднього обчислення ненадійності *Q*нг як добутку ненадійностей елементів полегшує розрахунки та надійності *R*нг паралельного з'єднання.

Насправді для швидкої оцінки величини ненадійності елементів часто використовується досить простий спосіб апроксимації. Розкладаючи *e*-λ*t* в ряд:

 (11.7)

отримаємо:

 (11.8)

Коли λ*t* набагато менше одиниці, можна з незначною похибкою знехтувати членом λ2*t*2/2! і наступними доданками. В результаті чого отримуємо:

 (11.9)

 (11.10)

Ці наближення можна використовувати лише грубої оцінки, коли λ*t* < 0.1. Коли проводяться більш складні обчислення, що вимагають високої точності, слід використовувати більш точні значення значення величини *e*-*x* принаймні до п'ятого знака, а можливо, і з більшою точністю.

Якщо елементи, що працюють паралельно, однакові, то формули (11.5) і (11.6) спрощуються:

 (11.11)

 (11.12)

де *Q* – ненадійність одного елемента.

Наведені формули справедливі також для випадку паралельної роботи групи елементів.

Коли стає необхідним резервування, часто з точки зору економічності конструкції переважно дублювати групу елементів або цілий ланцюг замість дублювання кожного елемента окремо. У разі спочатку обчислюється ненадійність *Q*i окремих послідовних груп чи ланцюгів, та був розраховуються *Q*нг і надійність *R*нг=1- *Q*нг всього паралельного з'єднання.

Як вказувалося, система послідовно з'єднаних елементів при експонентному законі відмов елементів має постійну інтенсивність відмов λст, яка дорівнює сумі інтенсивностей відмов всіх елементів. Надійність такої системи також змінюється експоненційно, а її середнє напрацювання на відмову дорівнює *m*ст=1/λст. Однак це вже не справедливо для системи із паралельно з'єднаними елементами. Миттєва інтенсивність відмов систем паралельно з'єднаних елементів є функцією часу *t*, хоча середня. напрацювання на відмову – постійна величина і може бути обчислена за відомої надійності системи *R*нг(*t*) всього паралельного з'єднання. за формулою (9.6).

# Лекція 12. НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМИ ПРИ НЕНАВАНТАЖЕНОМУ РЕЗЕРВІ

Насправді часто вдається здійснити паралельну роботу елементів за умов навантаженого резерву і доводиться застосовувати так зване «заміщення з ненавантаженим резервом». У цьому випадку, коли елемент або ланцюг працюють, є один або більше резервних елементів або ланцюгів, які можуть вступити в дію при відмові основного елемента або основного ланцюга.

При паралельній роботі в навантаженому режимі всі ланцюги працюють одночасно, а при ненавантаженому режимі резервні ланцюги знаходяться у відключеному стані та починають працювати, коли попередня ланцюг відмовляє. З'єднання при ненавантаженому режимі зазвичай вимагають контрольних приладів, що виявляють відмову, та перемикаючих пристроїв, що включають наступний ланцюг у роботу. Припустимо, що прилад, що виявляє відмову, і перемикач мають 100% надійність і що працюючі і резервні елементи мають однакову інтенсивність відмов λ.

Можна розглядати групу резервних елементів як єдиний ланцюг або систему, в якій допускається кілька відмов до того, як система остаточно припинить виконання своїх функцій. Якщо резервування одного основного елемента включаються п елементів, ми маємо у системі *n*+1 елементів, й у ній може статися п відмов, не викликаючи відмови системи. Тільки відмови (*п*+1) елементів викликають відмову всієї системи. Використовуючи [матеріали СРС до лекції 9, (9.2)], отримуємо таку тотожність:

 (12.1)

У цьому вираженні величина (*e*-λ*t*·1) являє собою ймовірність того, що не відбудеться жодної відмови, величина (*e*-λ*t*·λ*t*) дає ймовірність того, що відбудеться одна відмова, *e*-λ*t*·(λ*t*)2/2 ! - імовірність того, що відбудуться дві відмови і т.д. Отже, ймовірність того, що відбудеться одна відмова або не відбудеться жодної відмови, дорівнює *e*-λ*t*+e-λ*t*·(λ*t*). Імовірність того, що відбудеться не більше двох відмов, дорівнює *e*-λ*t*+*e*-λ*t*·(λ*t*)+ *e*-λ*t*·(λ*t*)2/2! і т. д. Ці ймовірності є надійністю багаторазово резервованих з'єднань, що складаються з однакових елементів, тобто з елементів, що мають однакову інтенсивність відмов.

Якщо позначити через *R*нн і *Q*нн відповідно надійність та ненадійність усієї системи з ненавантаженим резервом, то оскільки *R*нн+*Q*нн = 1, можна написати:

 (12.2)

Якщо допускається одна відмова, то:

 (12.3)

Формула (12.3) є надійністю системи при ненавантаженому резерві, що складається з одного працюючого елемента (або послідовно з'єднаної групи елементів) з постійною інтенсивністю відмов λ і резервного елемента (або групи елементів) з тією ж інтенсивністю відмов. Тоді ненадійність *Q*нн усієї системи при ненавантаженому резерві є ймовірністю того, що відбудуться принаймні дві відмови:

 (12.4)

Середнє напрацювання системи на відмову виходить інтегруванням *R*нн:

 (12.5)

Так само як і у випадку паралельно працюючих елементів у навантаженому режимі, інтенсивність відмови системи з ненавантаженим резервом не є постійною, і функція надійності, або ймовірності безвідмовної роботи, *R*нн(*t*) не є експоненційною.

Для системи з ненавантаженим резервом із трьох ланцюгів, кожен з яких має однакову постійну інтенсивність відмов, причому лише один ланцюг працює, а два інші знаходяться в резерві, маємо:

 (12.6)

 (12.7)

У загальному випадку, коли *п* однакових елементів або ланцюгів резервують один елемент або ланцюг:

 (12.8)

 (12.9)

Як приклад розрахуємо надійність для *t*=10 годин роботи системи, що складається з двох однакових ланцюгів, коли кожен має λ=0,01. Отримуємо:



тоді як надійність одного ланцюга дорівнює 0.90484, а надійність паралельного з'єднання двох ланцюгів із навантаженим резервом дорівнює 0.990945. Таким чином, при ненавантаженому резерві надійність дещо більша, ніж у паралельно працюючих ланцюгів з навантаженим резервом, хоча середнє напрацювання на відмову при ненавантаженому резерві значно вище. Однак ці переваги легко втрачаються, якщо надійність перемикаючих пристроїв *R*пер<1. Коли ланцюг включається таким чином, що ненадійність перемикаючого пристрою системи, в якій робочий ланцюг резервується один раз, не впливає на надійність ланцюга, що працює, отримуємо:

 (12.10)

Припущення у тому, що інтенсивність відмов резервної ланцюга дорівнює інтенсивності відмов робочого ланцюга, є винятком, ніж правилом. Наприклад, гідропривід може резервуватись електромотором, і можливий навіть третій резервний блок – пневматичний або механічний. У такому разі інтенсивність відмов блоків не буде однакова і вищезазначені формули не застосовні.

І тут необхідний інший метод. Він полягає у визначенні функції *f*(*t*) щільності розподілу відмов даної комбінації елементів у ненавантаженому резерві та обчисленні надійності системи інтегруванням цієї функції:



Зазначений метод має велику спільність і застосовується незалежно від того, однакові елементи чи ні і чи відмовляють вони за експоненційним або за будь-яким іншим законом.

# Лекція 13. ФОРМУЛА БАЙЄСА В ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

Не всі завдання теорії надійності можна звести до послідовним і паралельним системам, які обговорювалися в лекціях 10 – 12. Як було зазначено, є комбінації елементів, які є ні послідовними, ні паралельними.

Розглянемо блок-схему розрахунку надійності на мал. 11. Два однакових канали  і  включені паралельно, так що якщо принаймні один з них справний, то на виході немає відмов, проте якщо блоки *А* і *B* недостатньо надійні, то вводиться третій такий же блок З таким шляхом, що він може постачати або  чи  необхідним сигналом. Отже, можлива робота у наступних комбінаціях: , ,  і .Яка надійність такої схеми?

Якщо з'єднання у схемі здійснено так, як показано на мал. 12, було б легко розв'язати задачу розрахунком надійності верхнього ряду блоків *А*, *С* і *В*, з'єднаних паралельно, і множенням її на надійність з'єднаного в паралель нижнього ряду .

На мал. 12 зображено типовий випадок послідовного з'єднання двох паралельних з'єднань. Таке послідовне з'єднання виходить через те, що кожен елемент *А*, *B* і *C* може працювати самостійно як з , так і з . Проте схема на мал. 11 не допускає такого трактування.

|  |  |
| --- | --- |
| Мал. 11. Приклад використання формули Байєса в теорії надійності | Мал. 12. Випадок паралельного з'єднання |

Щоб вирішити це завдання, скористаємося спрощеним формулюванням теореми Байєса, яка говорить: якщо *А* – подія, яка залежить від однієї з двох несумісних подій *Вi* та *Вj* з яких хоча б одна обов'язково відбувається, то ймовірність появи події *А* дорівнює:

 (13.1)

Перекладаючи це на мову: надійності та позначаючи через *А* відмову системи, а через *Вi* та *Вj* – відповідно безвідмовну роботу та відмову деякого елемента або блоку, від якого залежить надійність системи, можна сформулювати таке правило: ймовірність відмови системи дорівнює ймовірності відмови системи за умови, що певний виділений елемент справний, помноженої на ймовірність того, що цей елемент справний, плюс ймовірність відмови системи за умови, що той самий елемент несправний, помноженої на ймовірність того, що цей елемент несправний, тобто.

(13.2)

У цій формулі *Х* – елемент або блок, від якого (справний, несправний) залежить надійність системи. Позначаючи через *Q*ст ймовірність відмови системи, а через *Rx* ймовірність того, що елемент *Х* справний і через *Qx* ймовірність того, що він несправний, перепишемо формулу (13.2) в наступному вигляді:

 (13.3)

Тоді надійність системи

 (13.4)

Формула (13.3) дає один із найпотужніших методів розрахунку надійності складних систем. Нижче буде показано, що ця формула має дуже загальний характер, проте спочатку закінчимо розгляд прикладу (див. мал. 11).

Нехай роль *Х* у формулі (13.3) виконує блок *С*:



Якщо *С* справний, система може відмовити лише за одночасної відмови  і . Оскільки  і  паралельні, ненадійність системи у разі, коли *С* справний, виявляється у вигляді:



Якщо *С* несправний, система може відмовити тільки за умови, що одночасно відмовлять обидва паралельні канали  та , і ненадійність системи у разі, коли *С* несправний, буде:



де  – ненадійність каналу, в якому *А* і  з'єднані послідовно, а  – ненадійність другого каналу, в якому послідовно з'єднані *В* і  . Оскільки два канали паралельні, твір їхньої ненадійності дає ненадійність паралельної сполуки.

Ненадійність усієї системи записується тепер у такому вигляді:



Нехай елементи *А*, *С* і *B* однакові і мають постійну інтенсивність відмов λ1, і нехай елементи  і  також однакові і мають постійну інтенсивність відмов λ2. Тоді:



і оскільки *R*ст=1-*Q*ст, то надійність системи дорівнює:



Вважаючи λ1=0.01 год-1, λ2=0.001 год-1, *t*=10 годин, отримаємо:



Використовуємо формулу (13.3) для визначення надійностей паралельного і послідовного з'єднань, знайдених раніше іншим шляхом.

Нехай елементи з надійностями *R*1 та *R*2 включені послідовно. Як елемент *Х* візьмемо, наприклад, той, надійність якого *R*2, і запишемо:



Доданок  потребує пояснення. Імовірність відмови системи, якщо несправний другий елемент, дорівнює одиниці, оскільки система в цьому випадку буде свідомо несправною, а ймовірність того, що несправний другий елемент дорівнює . Надійність системи тому дорівнюватиме:



Застосовуючи (13.3) до двох паралельно з'єднаних елементів, отримаємо:



Перше доданок у правій частині 0 *R*2 означає добуток ймовірності відмови системи за умови, що другий елемент справний, на ймовірність *R*2 того, що елемент справний (очевидно, якщо другий елемент справний, паралельна система не може відмовити). Надійність системи з двох паралельно з'єднаних елементів тоді дорівнює:



що збігається з відомою формулою.

У складних розрахунках надійності часто необхідно застосовувати формулу (13.3) в кілька етапів. Розглянемо, наприклад, чотири елементи, з'єднані паралельно. Нехай надійність елементів *R*1, *R*2, *R*3, *R*4. Умовимося, що потрібна робота хоча б одного елемента. Розрахунок робимо в наступній послідовності: спочатку визначаємо ненадійність системи:



Перше доданок праворуч дорівнює 0, якщо елемент 1 справний, тому що, якщо 1 справний, система не може відмовити, і *Q*ст (якщо 1 справний) повинна дорівнювати 0. Отже, залишається *Q*ст = *Q*ст (якщо 1 несправний) *Q*1. Наступним кроком є визначення *Q*ст (якщо 1 несправний). Тому розглянемо три елементи 2, 3, 4, що залишилися. Фіксуючи елемент 2, запишемо:



тому що перший доданок знову дорівнює 0. Отже, поєднуючи отримані раніше результати, маємо . Розглядаючи далі елемент 3, записуємо:



Отже, в результаті для системи з чотирьох паралельно з'єднаних елементів маємо:





Але якщо заздалегідь умовитися, що для безвідмовної роботи системи потрібна робота принаймні трьох (причому будь-яких трьох) із чотирьох елементів, розрахунок дещо ускладнюється. Перший крок такий самий, як у попередньому прикладі:



Однак перший доданок правої частини в нуль не звертається, так як при одному справному елементі система, проте, може бути в стані відмови. Для безвідмовної роботи системи потрібна робота трьох елементів, отже, система відмовить лише тоді, коли несправно щонайменше двох елементів. Таким чином, щоб отримати , ми повинні розрахувати ймовірність того, що з трьох елементів, що залишилися, відмовить не менше двох. Отже, розглядаємо елемент 2 та записуємо:



Перший доданок означає, що якщо 2 справний (*R*2), то, щоб викликати відмову системи, обидва елементи 3 і 4, що залишилися, повинні відмовити, оскільки відомо, що 1 справний. Друге доданок означає, що якщо 2 несправний (*Q*2) н відомо, що 1 справний, то принаймні один з двох елементів, що залишилися – або 3, або 4 – повинен бути несправним. Аналогічні міркування можна провести для доданку :



Таким чином, необхідно відмовити ще один елемент, якщо 2 справний. А якщо 2 несправні, то система вже відмовила, оскільки 1 несправний. Отже, , якщо 1 також несправний. Вираз для ненадійності системи тепер можна записати у вигляді:



Звідси надійність системи дорівнює:



Звичайно, той же результат можна було отримати, розкриваючи добуток  та використовуючи метод, викладений у [матеріалах СРС до лекції 11, (11.17)] для трьох елементів. Однак у цій лекції був спеціально розглянутий інший метод, оскільки у деяких випадках біноміальний закон розподілу неприйнятний і тоді необхідно проводити розрахунки крок за кроком із застосуванням зазначеної теореми теорії ймовірностей (як, наприклад, для схеми мал. 11). Отже дуже важливо, щоб ті, хто має справу зі складними розрахунками надійності, вміли застосовувати формулу (13.3). Її роль розрахунках надійності важко переоцінити.

# Лекція 14. ВИДИ ВІДМОВИВ ЕЛЕМЕНТІВ І НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМИ

Різновид формули (13.2) знаходить застосування, коли елемент або блок у схемі можуть бути два або більше виду відмов і необхідно визначити ймовірність кожного з цих типів відмов.

Розглянемо схему, показану на мал. 13. Вона складається із чотирьох основних ланцюгів; кожна має транзистор, захищений діодом по ланцюгу живлення і стабілітроном по ланцюгу відмикання (по ланцюгу бази). Для роботи цієї системи потрібно, щоб транзистори подавали живлення чотирьом елементам керуючої системи в строгій послідовності 1-2-3-4-1 і т. д, так що коли один транзистор проводить, що передає транзистор відключається. Послідовність перемикань регулюється відмикаючими імпульсами. Особливість схеми полягає в тому, що відмова системи відбувається, якщо будь-який із чотирьох ланцюгів закорочується. Тоді послідовність перемикань порушується, оскільки закорочений ланцюг постійно подає живлення. Наступна особливість полягає в тому, що робота схеми можлива, якщо в одному ланцюгу стався урвище, так що тільки три ланцюги подають послідовні імпульси живлення. Однак якщо одночасно відбувається обрив у двох ланцюгах, система не здатна до подальшої роботи. Таким чином, для надійності системи потрібно, щоб у жодному ланцюзі не було короткого замикання і щоб у ланцюзі було не більше одного урвища. Обчислимо надійність такого з'єднання елементів.

Як елемент *Х* приймаємо стабілітрон, тому що передбачається, що він не залежить від стану інших елементів. Тоді ненадійність одного ланцюга:

(14.1)

Ця формула збігається з (13.2) з тією лише відмінністю, що, дотримуючись правила Байєса, ми розклали величину *Р*(*Х* несправний) на дві складові, що відповідають двом випадкам, коли можлива відмова стабілітрона. Якщо можливі відмови інших типів, ніж урвище або коротке замикання, треба додати до (14.1) величину, яка б враховувала ймовірність цих відмов.

Чому вводяться ймовірності обриву чи короткого замикання? Якщо уважно поглянути на мал. 13 можна побачити, що небайдуже, чи мають елементи коротке замикання або обрив. Наприклад, якщо в стабілітроні виникло коротке замикання, імпульс, що відмикає, не буде подаватися на транзистор і ланцюг не буде включатися. Але якщо в стабілітроні є обрив, ланцюг залишатиметься увімкненим. Якщо в діоді виникає урвища, ланцюг відмовляє з тієї причини, що при цьому в систему не можна подати харчування, якщо ж у діоді виникло коротке замикання, то транзистор може продовжувати перемикатися і харчування подаватиметься в систему управління.

|  |
| --- |
| Мал. 13. Перемикаюча схема на транзисторах |

З формули (14.1) можна обчислити ненадійність одного ланцюга, *Q*нц=*Р*(відмови ланцюга), якщо точно визначити, що розуміти під "відмовою". Що стосується надійності всієї системи з чотирьох ланцюгів, то була поставлена вимога, щоб у жодному ланцюгу не було короткого замикання та допускався обрив не більш ніж в одному ланцюгу. Якщо позначити ймовірність відсутності короткого замикання в одному ланцюгу через *R*нн-з, то ймовірність того, що в жодному з чотирьох ланцюгів не буде короткого замикання, дорівнює  (якби чотири ланцюги були включені послідовно).

Якщо позначити через *R*нн-о ймовірність відсутності обриву в одному ланцюгу, то ймовірність того, що принаймні в трьох з чотирьох ланцюгів буде відсутній обрив, дорівнює  відповідно до [матеріали СРС до лекції 11, (11.15)]. Тоді надійність системи визначається ймовірністю того, що жодна з чотирьох ланцюгів не буде закорочена і не більше, ніж в одному з чотирьох ланцюгів буде обрив. Отже, надійність системи дорівнює твору:

 (14.2)

При цьому передбачається, що відмови внаслідок обриву чи короткого замикання є єдиними двома видами відмов, у яких ланцюга несправні.

Визначимо тепер величини *R*нн-з та *R*нн-о. Спочатку обчислимо ненадійності *R*нн–з і *R*нн-о, використовуючи (14.1) і замінюючи вираз "відмова ланцюга" на "коротке замикання в ланцюгу" при обчисленні *R*нн-з і на "обрив у ланцюгу" при обчисленні *R*нн-о. Перша з цих величин дорівнює *Р*(коротке замикання в ланцюзі, якщо стабілітрон справний)×*Р*(стабілітрон справний). Розглядаємо діод по ланцюгу живлення як елемент *Х*, так як він незалежний від стану транзистора. Тоді:



Всі ці висловлювання справедливі за умови, що стабілітрон справний. Далі, *Р*(коротке замикання в ланцюзі, якщо діод справний) дорівнює ймовірності короткого замикання в транзисторі, коли стабілітрон і діод справні. Але оскільки стабілітрон і діод повинні забезпечити повний захист транзистора, ненадійність транзистора буде дорівнює нулю, або буде надзвичайно малою величиною; Іншими словами, інтенсивність відмов транзистора може вважатися нулем доти, доки стабілітрон і діод справні і не перевищено встановленої температури. Розглянемо далі вираз *Р*(коротке замикання, якщо діод пробитий). Воно дорівнює ймовірності короткого замикання в транзисторі, коли стабілітрон справний, але діод пробитий і захищає транзистор. За цих умов транзистор працює в граничному режимі, тобто він може бути підданий впливу великих струмів і напруг, і, отже, може мати порівняно високу інтенсивність відмов. Нарешті, є член *Р*(коротке замикання в ланцюзі, якщо в діоді обрив), причому стабілітрон все ще вважається справним. Ця можливість дорівнює нулю, тому що при обриві в діоді ланцюг не буде закоротена.

Таким чином, вираз *Р*(коротке замикання в ланцюзі, якщо стабілітрон справний) показує, що для всіх практичних випадків воно дорівнює ймовірності короткого замикання в транзисторі, коли стабілітрон справний, а діод закорочен. Подібним чином можна проаналізувати вираз *Р*(коротке замикання в ланцюгу, якщо стабілітрон закорочен). Ясно, що цей вираз дорівнюватиме нулю, так як при закороченому стабілітроні транзистор не буде відмикатися в тому випадку, коли максимальна напруга живлення значно менше заданої напруги для даного типу транзистора, так як ланцюг не буде пробита. Останнє доданок у сумі дорівнює *Р*(коротке замикання в ланцюзі, якщо в стабілітроні обрив). Підсумовуючи ці висловлювання і виключаючи ті з них, які, за розумними припущеннями, дорівнюють нулю, отримуємо для ймовірності *Q*нн-з короткого замикання ланцюга наступне вираз:

 (14.3)

Аналогічно знаходимо ймовірність обриву в ланцюзі:

 (14.4)

Щоб підрахувати величину надійності системи, необхідно виразити ймовірності *Р*, у тому числі складаються *Q*нн-з і *Q*нн-о, як функції часу. Для цього необхідно знати інтенсивність відмов елементів при різних типах відмов. Коли є лише два типи відмов – обрив і коротке замикання, які взаємно виключають один одного, інтенсивність відмов елементів λ може бути прийнята рівною сумою інтенсивності відмов λз через коротке замикання та інтенсивності λо через обрив:



Якщо припустити, що елементи використовуються тільки в період нормальної експлуатації, інтенсивність відмов буде постійною для заданого рівня навантаження.

У прикладі чотирьох транзисторних ланцюгів необхідно досліджувати кілька рівнів навантаження, що визначаються тим, чи будуть захисні засоби справні або несправні. Рівень навантаження, якому піддається стабілітрон, визначається імпульсами відмикання. Припустимо, що стабілітрон має постійну повну інтенсивність відмов λ1 та постійні інтенсивності коротких замикань та обривів λ1-з та λ1-о протягом усієї роботи схеми. Діод може працювати у двох режимах залежно від того, чи захищений він стабілітроном, коли стабілітрон справний, або незахищений, коли у стабілітроні обрив. Транзистор може працювати в чотирьох режимах, тобто коли стабілітрон і діод справні, коли стабілітрон справний, а діод пробитий, коли в стабілітроні обрив, а діод справний і, нарешті, коли в стабілітроні обрив, а діод закорочен. Зведемо інтенсивності цих відмов у таблицю:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Інтенсивність відмов, що включає всі типи відмов | Інтенсивність коротких замикань | Інтенсивність урвищ |
| Стабілітрон | λ1 | λ1-з | λ1-о |
| Діод не захищений (обрив у стабілітроні) | λ2 | λ2-з | λ2-о |
| Діод захищений стабілітроном | λ3 | λ3-з | λ3-о |
| Транзистор не захищений (у стабілітроні урвище, діод пробитий) | λ4 | λ4-з | λ4-о |
| Транзистор захищений лише стабілітроном (діод пробитий) | λ5 | λ5-з | λ5-о |
| Транзистор захищений лише діодом (у стабілітроні урвище) | λ6 | λ6-з | λ6-о |
| Транзистор захищений стабілітроном та діодом | λ7 | λ7-з | λ7-о |

Якщо відомі зазначені інтенсивності відмов, можна, використовуючи формули (14.3), (14.4), визначити ймовірності відсутності короткого замикання *R*нн-з=1-*Q*нн-з та відсутності обриву *R*нн-o=1-*Q*нн-o в одному транзисторному ланцюзі, а також надійність Системи чотирьох ланцюгів як функції часу роботи *t*.

Обчислення значно спрощуються, якщо припустити, що інтенсивність відмов елементів не змінюється. Наприклад, для стабілітрона постійні інтенсивності обриву і короткого замикання рівні λдз-о і λдз-з, для діода λд-о і λд-з і для транзистора λт-о та λт-з. Таким чином, передбачається, що транзистор матиме зазначені інтенсивності відмов, яким би не був стан діода і стабілітрона, а діод матиме ці інтенсивності відмов, яким би не був стан стабілітрона.

Тоді з (14.3) маємо:

 (14.5)

а з (14.4) (з урахуванням, як і (14.3), рівного нулю першого доданку, оскільки транзистор у цьому випадку повністю захищений) отримаємо:

 (14.6)

Обчислення за цими формулами нескладні, отже, за формулою (14.2) легко обчислюється надійність системи. Якщо вибрані постійні інтенсивності відмов добре оцінюються середньою величиною, остаточний результат буде досить точним. У практичних розрахунках надійності, крім тих випадків, коли потрібна дуже висока точність, доцільно скористатися цим спрощеним способом під час аналізу складних схем і систем.

Дослідження функції  показує, що величина в дужках, що дорівнює ймовірності відсутності обриву в системі, значно ближче до одиниці, ніж  дорівнює ймовірності відсутності короткого замикання. Отже, щоб зробити систему надійнішою, зусилля мають бути зосереджені головним чином зменшенні ймовірності короткого замикання.

Розглянемо розрахунок надійності у разі, коли інтенсивність відмов залежить від того, що відбувається з іншими елементами. Раніше, у лекції 11 розглядався загальний випадок паралельної роботи елементів. Для двох однакових елементів, з'єднаних паралельно, була формула  в припущенні, що кожен з двох елементів має інтенсивність відмов λ як у випадку, коли вони працюють паралельно, так і в тому випадку, коли один відмовив, а інший продовжує при відповідному режимі виконувати необхідні функції. Це припущення справедливе у багатьох випадках, коли погіршення режиму допускається та враховується. Наприклад, система двох літакових генераторів на 40 кВт дає 80 кВт повної потужності. Але коли один генератор відмовляє, інший даватиме лише 40 КВт, при цьому несуттєві споживачі енергії відключаються, щоб уникнути перевантаження працюючого генератора. Таким чином, відмова одного генератора не викликає відмови електричної системи при подачі 40 КВт, і в основному не генератор, що відмовив, працює в тому ж режимі, як і раніше, коли працювали два генератори. Отже, з погляду такої функції системи два генератори працюють паралельно в тому самому режимі, що означає однакову інтенсивність відмов, навіть при відмові одного з них. Однак з точки зору здатності системи давати повні 80 КВт два генератори працюють послідовно, тому що, якщо один з них відмовив, 80 КВт більше не подаються, а це означає відмову системи у виконанні такої функції, як забезпечення потужності 80 КВт. Таким чином, система виконує дві функції: для однієї з них вона є послідовною, а для іншої – паралельною системою, і надійність системи при виконанні цих двох функцій обчислюється відповідно до раніше виведених формул для послідовної та паралельної роботи.

Але ситуація змінюється, якщо два паралельні елементи несуть повне навантаження (по 50% кожен) і коли один відмовляє, інший має нести 100% повного навантаження, встановленого для такої роботи. Якщо обидва елементи мають кожну інтенсивність відмов λ1, при паралельній роботі, то елемент, що не відмовив, буде після відмови іншого мати інтенсивність відмов λ2, тому що він став працювати у більш важкому режимі (рис. 14). Для визначення надійності такого паралельного з'єднання елементів можна представити його як систему з ненавантаженим резервним елементом, інтенсивність відмов якого дорівнює λ2. Коли кожен із двох працюючих елементів відмовляє, функції паралельної системи приймає він один резервний елемент. З цього погляду можна розглядати два працюючих елементи як один послідовний блок, який має інтенсивність відмов 2λ1 і, отже, надійність . Система загалом представляється як цього блоку, має ненавантаженный резервний елемент з інтенсивністю відмов λ2 (мал. 15). Тому система двох однакових елементів, з'єднаних паралельно, інтенсивність відмов яких змінюється від λ1 до λ2, коли один з них відмовляє, відповідає нагоди двох паралельних елементів з різною інтенсивністю відмов. Причому працюючий елемент має інтенсивність 2λ1, а ненавантажений резервний – λ2. Використовуючи формулу [матеріали СРС до лекції 12, (12.3)], знайдемо надійність системи двох паралельних елементів у цьому випадку:

 (14.7)

|  |  |
| --- | --- |
| Мал. 14. Паралельне з'єднання елементів із розподіленим навантаженням | Мал. 15. Еквівалентна блок-схема ненадійності |

Коли два паралельно з'єднані елементи неоднакові, завдання стає складнішим. Нехай два елементи, що працюють паралельно, мають інтенсивність відмов λА і λВ, і якщо елемент *B* відмовляє першим, інтенсивність відмов *А* змінюється від λА до , а якщо *А* відмовляє першим, інтенсивність відмов *B* змінюється від λВ до . Таким чином, можна уявити, що є два елементи з інтенсивністю відмов  і  , що знаходяться в режимі ненавантаженого резерву. Паралельна система сприймається як послідовна ланцюг з інтенсивністю відмов λ*А*+λ*B*. При такому трактуванні отримуємо, що якщо елемент *А* відмовляє першим, його для продовження роботи замінює резервний елемент з інтенсивністю відмов , а якщо *B* відмовляє першим, то включається інший резервний елемент з інтенсивністю відмов . Отже, система з ненавантаженим резервом може відмовити двома способами:

1. Елемент *А* відмовляє в момент *t*A і його замінює елемент *B* з інтенсивністю відмов , що відмовляє за інтервал часу t.

2. Елемент *B* відмовляє в момент *tB* і його замінює елемент *А* з інтенсивністю відмов, що відмовляє за інтервал часу *t*.

Ці дві події мають відповідно до ймовірності *Р*(1) і *Р*(2), які можна обчислити інтегруванням щільностей розподілу, як це було показано в лекції 12. Тоді ненадійність системи *Q*ст дорівнює сумі двох ймовірностей, тобто *Q*ст=*Р*(1)+*Р*(2), а надійність системи дорівнює:



Обчислення здійснюються таким чином:

 (14.8)

 (14.9)

Тоді надійність цієї системи з ненавантаженим резервом дорівнює:

 (4.10)

Якщо , то

 (4.11)

Подібним чином, якщо , то

 (4.12)

Якщо , то

 (4.13)

що безпосередньо випливає також із (Лекції, 12.3).

Якщо припустити, що елементи не змінюють свою інтенсивність відмов, то (14.7) та (14.10) відповідно зводяться до простих формул [СРС, (11.4)] та (10.11) надійності паралельного з'єднання.

Якщо навантаження при паралельній роботі розділяється між трьома і більше елементами, але кожен з них здатний один нести повне навантаження, коли всі інші елементи відмовили, то не елементи, що відмовили, в цьому випадку мають все більш і більш високі інтенсивності відмов, тобто надійність їх знижується при відмові інших елементів. Якщо при цьому елементи неоднакові, то можна використовувати описаний вище метод, хоча формули, очевидно, стають більш громіздкими. Якщо ж елементи однакові, як це зазвичай буває у разі паралельної роботи, метод буде аналогічним методу, використаному раніше в цьому розділі для двох однакових елементів (див. мал. 14 та 15).

# Лекція 15. ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РІВНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Описані вище методи, призначені для визначення надійності різних поєднань елементів, дають можливість розрахувати надійність навіть розгалужених і складних систем. Системи можуть мати послідовне з'єднання елементів, а резервування може бути постійним або із заміщенням. Однак бувають і такі з'єднання елементів, які не можуть бути точно віднесені до жодної з цих категорій, і тоді слід користуватися теоремою Байєса.

Для всіх розрахунків надійності системи є одна загальна фундаментальна умова: надійність основних елементів, що утворюють систему, повинні бути відомі. Ці надійності мають бути визначені з дослідів, спостережень чи випробувань як інтенсивності відмов, середніх напрацювань на відмову чи середнього числа циклів між отказами. Нижче буде показано, як розраховуються або оцінюються ці основні параметри даних випробувань на надійність.

При розгляді закону розподілу відмов було показано, що інтенсивність відмов елементів може бути або постійними, або змінюватися залежно від часу експлуатації елемента. Відповідно до цього надійність елементів може залежати або не залежати від часу експлуатації елемента. Таким чином, незважаючи на те, що надійність завжди функціонально залежить від напрацювання *t*, вона не обов'язково повинна змінюватися зі збільшенням часу експлуатації елемента або системи *Т*. У тому випадку, коли надійність не залежить від часу експлуатації, елемент або система, що мали за період роботи *t* надійність *R*(*t*), матимуть у деякий наступний період тієї ж тривалості *t* ту саму надійність *R*(*t*), навіть якщо між цими періодами елемент або система пропрацювали протягом сотень і тисяч годин. Ця особливість властива елементам з надійністю, що описується експоненційною формулою, параметри яких не погіршуються з часом і які піддаються лише раптовим відмовам. Надійність системи, побудованої з таких елементів, також може описуватися експоненційною формулою, якщо її елементи з'єднані послідовно, але вона буде описуватися неекспоненційною формулою, коли вони з'єднані паралельно або за будь-якою іншою схемою.

Відмов систем відбуваються через відмов елементів. Якщо елементи схильні лише до раптових відмов, то й система відмовлятиме лише раптово. Але якщо елементи в системі схильні до зносу – а це означає, що профілактичні заміни не виробляються і елементи замінюються тільки після їх відмови, – то знос такої системи призведе до дуже високої інтенсивності відмов і низької надійності. Якщо виникають лише раптові відмови, середнє напрацювання на відмову елементів у надійно спроектованих системах може досягти сотень тисяч, а то й мільйонів годин. Як відомо, це не означає, що елемент дійсно може працювати протягом такого тривалого періоду; найімовірніше, що елемент зноситься значно раніше. Довговічності елементів зазвичай набагато менше, ніж їхні середні напрацювання на раптову відмову. Як було вже сказано, час 10000 годин вважається дуже високою середньою довговічністю. Отже, елемент із середнім напрацюванням на раптову відмову, що дорівнює, скажімо, 100000 годин, що входить у систему, спроектовану на роботу протягом тривалого часу, може протягом перших кількох тисяч годин роботи мати середнє напрацювання на відмову тільки близько 10000 годин або менше, якщо не практикується профілактична заміна елементів. Системи, у яких не проводиться профілактична заміна елементів, характеризуються швидким наростанням інтенсивності відмов елементів.

У тих випадках, коли надійність відіграє важливу роль, необхідно вжити всіх заходів, щоб правильно скласти план заміни елементів і тим самим отримати впевненість, що елементи працюють лише в межах їх нормальної експлуатації. Такий підхід особливо важливий для систем, призначених для застосування протягом тривалого часу, для яких має бути забезпечене регулярне обслуговування. Це не відноситься до систем короткочасної дії, наприклад, до керованих снарядів, для яких ймовірності зносу надзвичайно малі. Таким чином, у системах, в яких передбачено обслуговування, мають місце лише раптові відмови, і це означає, що для аналізу надійності елементів таких систем завжди можна з успіхом користуватися формулою , де λ – інтенсивність раптових відмов. Це значною мірою полегшує розрахунок надійності складних систем.

Складні системи складаються з безлічі елементів, з'єднаних у різний спосіб. Коли система перебуває в експлуатації, деякі її елементи працюють безперервно, інші – лише протягом коротких проміжків часу або кількох циклів, а треті виконують лише одну коротку операцію під час увімкнення або вимкнення системи. Отже, протягом заданого часу *t* роботи системи, для якої потрібно розрахувати надійність, тільки деякі певні елементи працюють протягом усього цього часу, інші елементи працюють більш короткий час. Отже, щоб розрахувати надійність системи, у якій всі елементи працюють із однаковою тривалістю, слід ув'язати часи роботи елементів із загальним часом роботи системи.

Нехай, наприклад, потрібно розрахувати надійність системи для 10-годинного періоду роботи. Оскільки відомо, що надійність системи складається з надійностей її елементів, слід співвіднести надійність елементів із загальним часом роботи системи. Надійності елементів системи, що працюють безперервно, мають бути визначені на 10-годинний період роботи. Отже, якщо інтенсивність відмов одного з цих елементів дорівнює λ, то його надійність при 10-годинній роботі системи дорівнюватиме *ехр*(-10λ). Однак якщо елемент працює тільки 1 годину з 10-годинного періоду роботи системи, то його надійність протягом цього 10-годинного періоду дорівнюватиме *ехр*(-λ), що являє собою надійність цього елемента для 1-годинного періоду роботи. Так само, якщо інший елемент працює тільки протягом 5 хв з 10 годин роботи системи, наприклад, коли цей елемент бере участь тільки в операції включення системи, його надійність для всього 10-годинного періоду роботи системи буде дорівнює *ехр*(-λ/12) . Таким чином, для заданого напрацювання системи розглядається лише час, протягом якого окремі елементи включені. Такий підхід можливий, якщо припустити, що протягом періодів, коли елемент не включений, тобто коли він не працює, його інтенсивність відмов дорівнює нулю.

Елементи, що працюють з різною тривалістю, можуть бути з'єднані в системі послідовно, і це найпоширеніший випадок. У таких випадках використовується правило добутку надійностей, згідно з яким надійність *R*ст(*t*) системи з послідовним з'єднанням елементів, що працює протягом *t* годин, дорівнює добутку надійностей її елементів:

 (15.1)

де *R*i(*t*i) – надійність *i*-го елемента, що включається на *t*i годин із загального часу роботи системи *t* годин. Виражаючи надійність елементів експоненціальними функціями, формулу (15.1) можна записати так:

 (15.2)

З порівняння цього виразу з (10.14) видно, що в цьому випадку напрацювання елементів не рівні між собою, тоді як (10.14) всі напрацювання елементів дорівнювали *t*. У виразі (15.2) суттєво, що напрацювання елементів *t*1, *t*2 тощо. – це тривалість проміжків часу, коли відповідні елементи включені у роботу протягом загального часу роботи системи *t*.

Формулу (15.2) можна перетворити на загальний час роботи системи, ввівши поняття *коефіцієнта зайнятості елемента*. Коефіцієнт зайнятості *i*-го елемента визначається як *d*i=*t*i/*t* і є відношення часу роботи елемента, тобто тривалості періоду, коли він включений, *t*i, до загального часу роботи *t*. Отже, неробочий період елемента дорівнює *t*-*t*i, час роботи одно *t*i=*d*i*t*. Тоді (15.2) перетворюється на вид:

 (15.3)

Отже, надійність *i*-го елемента системи, має коефіцієнт зайнятості *di*, дорівнює *ехр*(-λi*d*i*t*) при напрацюванні системи *t*. Практичний сенс цього у тому, що з елемента з відомої інтенсивністю відмов λi інтенсивність відмов у системі дорівнюватиме λ=λi*d*i, оскільки коефіцієнт зайнятості дорівнює *di*. Такий підхід використовується також, коли для виконання певних функцій кілька підсистем мають бути з'єднані в одну систему, причому всі підсистеми або деякі з них працюють не весь період роботи системи.

Аналогічний випадок має місце, коли для успішного виконання функцій необхідна робота двох систем. Наприклад, успіх дії ракети залежить від її запуску та подальших операцій, а не тільки від надійності самої ракети після запуску. Вочевидь, що час роботи пускової системи *t*пс і ракети *t*р – по-різному. Однак у разі час *t*пс не є частиною періоду роботи ракети *t*р. Але ймовірність успішної дії, як і раніше, дорівнює добутку надійностей пускової системи та ракети:



Якщо λпс і λр – інтенсивності відмов відповідно до пускової системи та ракети, то можна записати, що *R*=*ехр*(-λпс*t*пс-λр*t*р). Нехай система відмовляє в середньому один раз за кожні 1/λпс годин роботи пускової системи, а ракета відмовляє один раз за кожні 1/λр годин роботи ракети. Яке середнє напрацювання на відмову під час спільної роботи пускової системи та ракети?

Як загальний час спільної роботи у заданому випадку використовується сума часів *t*=*t*пс+*t*р. Протягом цього часу *t* пускова система працює з коефіцієнтом зайнятості *d*пс=*t*пс/(*t*пс+*t*р), а ракета – з коефіцієнтом зайнятості *d*р=*t*р/(*t*пс+*t*р). Отже, загальна інтенсивність відмов при спільній роботі дорівнює:



а середнє напрацювання на відмову складе .

Іншим фактором, який слід враховувати при аналізі надійності системи, є рівень навантаження, з яким працюють елементи в системі, оскільки визначає величину очікуваної інтенсивності відмов елементів у системі. Коли кажуть, що інтенсивність відмов якогось елемента постійна, це відноситься до певного рівня робочих навантажень і навантажень, викликаних впливом зовнішнього середовища. Інтенсивності відмов елементів істотно змінюються навіть за невеликих змін рівня навантаження, що впливає на елементи. Саме взаємодія між міцністю елемента, з одного боку, та рівнем навантаження, що впливає на працюючий елемент, з іншого боку, визначає інтенсивність відмов елемента у заданих умовах. Таким чином, за різних рівнів навантаження інтенсивності відмов елементів неминуче будуть різними.

Фізичний процес, визначальний інтенсивність відмов елемента, ілюструється мал. 16. Зигзагоподібною лінією показано зміну навантаження у часі. Стрибки навантаження виникають через випадкові проміжки часу. Суцільною лінією показано зміну міцності елемента *S*1. З кривої видно, що у період роботи з моменту *t*=0 до моменту *t*=*Т* рівень навантаження вбирається у міцності елемента і, отже, елемент не відмовить. Однак якщо застосовується слабший елемент з міцністю *S*2 (пунктирна лінія), такий елемент вже відмовить на момент *t*=*Т*1, що може викликати відмову всієї системи. Отже, він має бути замінений. Практично за показаний період роботи системи при використанні елементів з міцністю *S*2 спостерігалося близько 8 відмов, що означає необхідність восьми замін. З наведеної кривої слід також, що вже при незначному зростанні стрибків навантаження елемент *S*1 також відмовить і в період роботи виявляться необхідними дві або кілька його замін.

|  |
| --- |
| Мал. 16. Зміна міцності елемента залежно від діапазону навантажень |

Подальше ускладнення пов'язане з тим, що елементи, вибрані з готової продукції, ніколи не мають абсолютно однакової міцності. Міцність елементів може бути нормально або логарифмічно нормально розподілена навколо середнього значення міцності *S*ср з деяким стандартним відхиленням від нього, причому цей розподіл буде одночасно і розподілом частоти відмов елемента. Аналогічно можна уявити також, що навантаження розподілені навколо деякого середнього значення навантаження *М* зі своїм стандартним відхиленням. Це ілюструється кривою на рис. 17. Значення інтенсивності відмов елемента із середньою міцністю *S*ср, який впливають навантаження із середнім значенням *М*, виходить у точці перетину двох кривих розподілу. Для цього, звичайно, необхідно знати стандартні відхилення кожного із зазначених розподілів.

|  |
| --- |
| Мал. 17. Розподіл навантажень та міцності елементів |

Однак такий підхід практично неможливий через неможливість точного визначення міцності та характеру навантажень в елементі, оскільки вони залежать від складної суміші різноманітних фізичних та інших параметрів. "Міцність" елемента, наприклад, означає не тільки його опір механічним навантаженням, вібраціям, ударам, тиску або прискорення; до категорії міцності відносяться також: опір тепловим навантаженням – здатність витримувати температурні напруги, що викликаються довкіллям або теплом, що розвивається в самому елементі, – а також циклічним тепловим навантаженням; електрична міцність, тобто здатність протистояти електричним напругам та коливанням напруги (вплив частоти); вологостійкість, корозійностійкість, стійкість до випромінювань і т. д. Тому очевидно, що міцність елемента не може бути виражена деякою числовою величиною, і не існує одиниць виміру міцності, які б враховували всі ці фактори.

Ті самі міркування застосовні і до поняття «розподіл робочих навантажень». Є безліч різних видів навантажень, що впливають на працюючий елемент, а способи вираження сукупності цих навантажень у вигляді деякої числової величини невідомі. Насправді ми маємо тут справу з прикладом різноманіття природи та наявністю багатовимірного простору параметрів, що описують навантаження та міцність, тому ніякі фізичні вимірювання ніколи не дадуть можливості передбачити інтенсивність відмов елементів за допомогою таких способів.

Тому ми змушені використовувати статистичні методи і за допомогою статистичних випробувань визначати ефект відмови елемента в часі, замість того щоб намагатися визначити точний характер зміни навантажень з плином часу. Для цього генеральну сукупність елементів піддають впливу робочого навантаження та визначають кількість елементів, що відмовляють протягом заданого періоду роботи. В результаті виходить оцінка інтенсивності відмов елемента заданого рівня навантаження. Потім можна по одному змінювати деякі параметри напруги, наприклад збільшувати або зменшувати напругу електричного струму або температуру, і повторювати весь експеримент в нових умовах. Тоді отримують інформацію про характер зміни інтенсивності відмов елементів, що розглядаються, залежно від величини прикладеної електричної напруги або температури зовнішнього середовища. Таким чином, інтенсивність відмов, що вимірюється як кількість відмов в одиницю часу, замінює нам точну міру міцності елемента.

Елементи проектуються так, щоб вони могли витримувати певні номінальні робочі навантаження. Кажуть, що вони розраховані на «номінальне значення» робочої напруги, сили струму, частоти, температури, вібрації, ударів, прискорення, вологості і т.д. певна інтенсивність відмов. Її називають номінальною інтенсивністю відмов елементів, оскільки вона має місце під час роботи з номінальними значеннями параметрів.

Добре відомо, що при збільшенні загального робочого навантаження або деяких приватних навантажень понад номінальний рівень інтенсивність відмов елемента досить різко зростає в порівнянні зі своїм номінальним значенням. І навпаки, інтенсивність відмов убуває, коли напруги стають нижчими за номінальний рівень. Криві на мал. 18 ілюструють загальний характер зміни інтенсивності відмов електричних та електронних елементів.

Значення інтенсивності відмов на наведених кривих зростає за логарифмічним законом. Криві показують, як можна зменшити інтенсивність відмов елементів, щоб вона стала меншою за своє номінальне значення. Так, якщо елемент повинен працювати при номінальному значенні потужності (крива 100%), шляхом зменшення, наприклад, температури (в результаті застосування герметизації або, якщо це необхідно, додаткової системи примусового охолодження) можна знизити інтенсивність відмов елемента. У тих випадках, коли значне зменшення температури тягне за собою занадто велике додаткове збільшення ваги апаратури, вигіднішим може виявитися вибір елементів з подвоєним номінальним значенням потужності та застосування їх при потужностях, рівних лише 0.5 від номінальної. У цьому випадку апаратура може стати дешевшою, а додаткова вага – менша, ніж, скажімо, при застосуванні системи примусового охолодження. З кривих видно, що суттєве скорочення інтенсивності відмов досягається, коли елементи з підвищеними номінальними значеннями параметрів використовуються при навантаженнях, рівних половині або однієї третини цих номінальних значень.

|  |
| --- |
| Мал. 18. Інтенсивність відмов залежно від навколишніх умов |

Дуже хороші результати з точки зору збільшення надійності елементів виходять при поєднанні обох методів – зменшенні температури та застосуванні елементів із підвищеними номінальними значеннями. Це – «золоте правило» у проектуванні надійної апаратури, зокрема електронних систем, де вдається домогтися збільшення середніх напрацювань на відмову елементів від значень порядку 105 годин при роботі з номінальними параметрами до величин порядку 108 і 107 годин і більше за «полегшених» режимів роботи .

Таким чином, шляхом полегшення режимів роботи елементів, тобто при роботі з рівнями навантажень, значно меншими, ніж їх номінальні значення, можна досягти подальшого суттєвого збільшення надійностей самих по собі надійних елементів.

Звичайно, цей дуже важливий принцип забезпечення надійності не звільняє від необхідності ретельного відбракування для усунення дефектних елементів, що викликають відмови на ранньому етапі експлуатації. Однак це не входить у завдання конструктора, а відноситься до галузі засобів контролю якості, приймального контролю елементів та функціональних випробувань виготовленої та припрацьованої апаратури до здачі її в експлуатацію. Але ні контроль якості, ні контроль при прийманні, ні випробування не допоможуть у тому випадку, коли при проектуванні не приділялося достатньої уваги надійності апаратури. Все, чого можна досягти в результаті ретельного контролю та випробувань, – це переконатися в тому, що надійність виготовленої апаратури відповідає запроектованому рівню, та забезпечити, щоб відмови на ранньому етапі (через дефектні елементи, погані з'єднання, помилки при складанні тощо). д.) не відображалися на всій системі або могли бути усунені.

Навантаження, що впливають на елементи, можна розбити на дві групи:

1. Навантаження, спричинені впливом зовнішнього середовища і впливають на елементи незалежно від того, чи вони працюють у системі чи вимкнені. До таких впливів відносяться вологість, атмосферний тиск, радіація, хімічний склад та забруднення атмосфери, мікроорганізми та температура навколишнього середовища у місці знаходження елемента. Вони зазвичай не викликають раптових відмов невключених елементів, але при тривалому впливі можуть зменшити міцність елемента. Якщо бездіючий елемент знаходиться в працюючій системі, то, крім зазначених вище факторів зовнішнього середовища, на нього можуть впливати механічні навантаження, такі як вібрація, удари і прискорення. Ці навантаження також відносяться до факторів зовнішнього середовища і впливають на елемент незалежно від того, знаходиться він у роботі або простоює, але вони відрізняються від інших навантажень тим, що можуть призвести до раптової відмови елемента, оскільки вони викликають втому матеріалу і тим самим знижують механічну міцність елемента.

2. Робочі навантаження, що з'являються тільки в умовах активної роботи елемента, такі, як напруга, частота, сила струму і тепло, що виділяється в елементі, а також механічні навантаження, що виникають в самому елементі, такі, як тертя і вібрація, якщо елементи або його частини, як, наприклад, реле, приводи або пристрої, що обертаються, беруть участь у механічних переміщеннях. Ці навантаження зазвичай призводять до раптових відмов, але одночасно вони також значно сприяють зменшенню міцності елемента, що виражається у його зносі.

З погляду експоненційного закону відмов електронних компонентів у період нормальної експлуатації насамперед становлять інтерес навантаження, які можуть спричинити раптові відмови. До них відносяться головним чином напруги, струми перехідних режимів та високі робочі температури. Сюди можна віднести також удари, тертя та вібрацію, коли вони перевищують розрахункові значення механічної міцності елемента чи міцності монтажних пристроїв. Наприклад, особливо ретельно слід уникати вібрації на резонансної частоті. У сукупності з монтажем елементи мають певну масу і пружність, і, отже, вони зазвичай мають певні частоти власних коливань. Ці власні частоти повинні значно перевищувати максимальну частоту вимушених коливань, що виникають при зовнішньому впливі.

Випадкові впливи ударів, тертя, вібрації можуть бути зведені до мінімуму або навіть цілком виключені завдяки вдалій конструкції механічної частини, монтажу та компонування. Одним з дуже успішних способів конструювання є герметизація елементів шляхом заливання їх матеріалами з високою постійною діелектричною і хорошою теплопровідністю. При відповідній герметизації зношування під впливом навантажень зовнішнього середовища, перерахованих у п. 1, зменшиться до мінімуму, хоча відомо, що повного захисту від проникнення вологи, корозії або випромінювання не існує.

Навантаження з боку зовнішнього середовища та їх вплив, що викликає знос, слід розглядати у зв'язку із середньою довговічністю та терміном зберігання елементів. Елементи, що зберігаються протягом тривалого часу, поглинають вологу. У деяких випадках ця волога може бути вилучена при сушінні; в інших випадках тривале перебування у вологій атмосфері спричиняє незворотне пошкодження. Часто кажуть, деякі елементи, наприклад, напівпровідники, мають вищу надійність після періоду роботи протягом кількох тисяч годин, ніж вони взяті зі складу. Нагрів у процесі роботи часто забезпечує добрий захист проти вологості.

При дослідженні впливу навантажень першим кроком є ​​визначення навантажень, які особливо сильно позначаються на інтенсивності раптових відмов елемента. Для електричних та електронних елементів основними причинами раптових відмов, як правило, є температурні та електричні напруги, для гідравлічних елементів – тиск у трубах, а для інших елементів – ті фізичні процеси, на яких ґрунтується їх робота. При цьому завжди слід додатково враховувати і вплив температури.

Такий аналіз дає можливість побудувати більш обґрунтовані та практично прийнятні криві залежності інтенсивності відмов елементів різних типів від прикладених навантажень.

Широке застосування під час аналізу надійності знайшов метод визначення інтенсивності відмов електронних елементів з допомогою сімейства кривих, аналогічних наведеним мал. 18 де по осі абсцис відкладена тільки температура. По осі ординат відкладаються зазвичай значення логарифмів інтенсивності відмов, які виражаються у відсотках відмов на тисячу годин напрацювання. Таким чином, інтенсивності відмов, що дорівнює 1% на 1000 годин, відповідає λ=0.00001 год-1, або середнє напрацювання на відмову 100000 годин, а інтенсивності відмов у 0,01% на 1000 годин відповідає λ=0.0000001 год-1, або наробіток на відмову 10 000 000 годин і т. д. Кожна крива на такому графіку є, таким чином, зміною інтенсивності відмов елемента в залежності від температури при заданих значеннях робочого навантаження або робочого рівня потужності.

Важливо зрозуміти, що кожне таке сімейство кривих залежно від інтенсивності відмов від навантаження і температури або від потужності і температури найбільш придатне для елементів певного типу, що працюють при заданому рівні механічних навантажень.

Іноді приймають, що залежність інтенсивностей відмов елементів від температури і напруги в діелектриці слідує *закону Арреніуса* або так званому *закону п'ятого ступеня*. За законом Арреніуса, швидкість хімічних реакцій розчинів приблизно подвоюється при підвищенні температури на кожні 10°С. З цього прийнято дуже грубе правило, за яким інтенсивності відмов елементів подвоюються зі збільшенням температури кожні 10°С. Закон п'ятого ступеня також дає дуже грубе наближення до дійсності. За цим законом довговічність конденсаторів деяких типів обернено пропорційна робочому напрузі в п'ятій @ температурі. Цей закон був використаний для твердження, що інтенсивності відмов елементів змінюються прямо пропорційно до п'ятого ступеня робочої напруги.

Більш правильно було б припустити, що інтенсивності відмов змінюються пропорційно *n*-й ступеня робочої напруги, і прийняти, що вони подвоюються зі збільшенням температури на кожні *Т* *град*. В результаті такого підходу одержують таку формулу для зміни інтенсивностей відмов:

 (15.4)

де λ1 – відома інтенсивність відмов при робочому напрузі *V*1 вольт і температурі C, а λ2 – інтенсивність відмов елемента при робочому напрузі *V*2 вольт і температурі C. Причому передбачається, що механічні напруги залишаються колишньому рівні. Показник ступеня *n* і значення *K* повинні бути визначені експериментальним шляхом. Вони змінюються для кожної партії та типу елементів. Величина *K* є коефіцієнт зміни інтенсивності відмов при зміні температури на 1°С. Для звичайних відносин номінальної напруги до робочого та номінальної температури до робочої (робочі значення завжди менше номінальних) величини *n* і *К* можна вважати постійними для елементів заданого виду. Залежно від виду та типу елементів значення *n* зазвичай змінюються від 4 до 10, а значення *К* – в межах від 1.02 до 1.15.

Експериментально величини *n* і *K* визначають наступним чином. Насамперед напруга підтримують постійним з його номінальному значенні *Vr* і проводять спочатку випробування на інтенсивність відмов при кімнатній температурі *t*1, а потім інше випробування при температурі *t*2. Це дає можливість визначити *К* за формулою:

 (15.5)

Потім проводять третє випробування на інтенсивність відмов при кімнатній температурі *t*1, але при робочому напрузі, зменшеному вдвічі порівняно з номінальним значенням *Vr*/2, у результаті виходить інтенсивність відмов λ3. З цього випробування визначають величину:

 (15.6)

Якщо відомі значення *К* і *n*, можна побудувати все сімейство кривих зміни інтенсивності відмов залежно від напруги і температури, а за цими кривими безпосередньо визначити інтенсивність відмов для заданої робочої напруги в межах від 0.1 до 1.0 від номінального значення заданої робочої температури. Складання таких кривих входить до обов'язків виробників елементів, які можуть визначити параметри *К* і *n* за результатами трьох випробувань на інтенсивність відмов.

Ті самі принципи застосовні також у разі, коли замість напруги задана потужність, як це буває зазвичай при застосуванні таких елементів, як опору, діоди і т. д. Звичайно, користуватися при визначенні інтенсивності відмов кривими, отриманими таким шляхом, слід з обережністю, для цього є дві причини:

* по-перше, *n* і *К* не залишаються абсолютно незмінними у всьому діапазоні зміни температури та напруги. Наприклад, коли робота відбувається при напругах і температурах вище за номінальні, ці коефіцієнти можуть порівняно швидко зростати;
* по-друге, сімейство таких кривих, строго кажучи, відноситься лише до деякого заданого рівня механічних та інших навантажень. При збільшенні цих навантажень інтенсивність раптових відмов також може зрости.

Однак у результаті застосування герметичних ущільнень, заливки та правильного способу блокової компонування та монтажу вплив навантажень на інтенсивність раптових відмов може бути значною мірою зменшено. При правильних розрахунках, збиранні і компонуванні апаратури можна вважати, що є лише електричні і теплові навантаження як основні чинники, що визначають інтенсивності відмов електричних та електронних елементів.

Зміна рівнів навантажень впливає також на довговічність елементів та їх стандартні відхилення, аналогічно його впливу на інтенсивності раптових відмов. Зменшення навантажень призводить до збільшення середньої довговічності, але зазвичай при цьому збільшується стандартне відхилення. При збільшенні навантажень середня довговічність зменшується, зазвичай зменшується стандартне відхилення. Це означає, що при профілактичному ремонті елементи, що працюють при підвищених рівнях навантажень, повинні профілактично замінюватися раніше, ніж такі елементи, що працюють при нижчих рівнях навантажень.

На закінчення слід зазначити, що для найбільш успішного використання кривих залежності інтенсивності відмов від навантажень конструктор або інженер з надійності повинен добре знати величину очікуваних рівнів навантажень, при яких елементи працюватимуть в апаратурі або системі. Отже, необхідний правильний аналіз навантажень, на підставі якого можна передбачити робочі температури окремих елементів за різних робочих умов та очікувані величини електричних або інших параметрів з урахуванням перехідних режимів. Правильне розуміння та вивчення розподілу навантажень, що впливають на окремі елементи, призводять до значного підвищення точності розрахунку надійності.

# Лекція 16. КОЕФІЦІЄНТ ГОТОВНОСТІ З ОБЛІКОМ І БЕЗ ОБЛІКУ ПРОФІЛАКТИКИ

Всі системи, що відновлюються, застосовувані для безперервної або тимчасової експлуатації, періодично вимагають обслуговування. Обслуговування буває двох видів. По-перше, позапланове, необхідне внаслідок виникнення відмов або через неправильну роботу експлуатованої системи. Метою такого обслуговування є відновлення функцій системи шляхом заміни, ремонту чи налагодження елементів, що спричиняють порушення роботи. По-друге, планове обслуговування через регулярні часові відтинки. Метою такого обслуговування є збереження системи у стані, що забезпечує задані рівні надійності, а там, де це потрібно – безпеки.

До планового обслуговування входять контроль, перевірка, а також малі та великі огляди, в процесі яких:

1) забезпечується регулярне обслуговування нормально працюючих підсистем та елементів, що потребують постійної уваги (мастило, заправка пальним, очищення, регулювання, перевірка тощо);

2) перевіряються, замінюються або ремонтуються резервні елементи, що відмовили, якщо система резервована;

3) замінюються або оглядаються елементи, близькі до зношування.

Ці операції виконуються з метою запобігти зростанню інтенсивності відмов елементів та системи та не допустити перевищення розрахункового рівня інтенсивності відмов. У зв'язку з цим планове обслуговування називають також *профілактичним*.

Періодичність виконання обслуговування типу 1 для запобігання зменшення надійності системи залежить від фізичних характеристик елементів, що застосовуються. Обслуговування третього типу залежить від статистичних характеристик зношування елементів, як це було показано в лекціях 6-8. Отже, періодичність обслуговування типу 3 буде різною для різних типів елементів, хоча заздалегідь можуть бути складені оптимальні плани профілактичного обслуговування для кожної системи; можна також визначити необхідну кількість людино-годин та час, необхідний для виконання заходів з обслуговування.

Періодичність обслуговування типу 2 залежить від інтенсивності відмов елементів у резервованій системі та від вимог до надійності, з якою має працювати така система. Для кожного типу обслуговування може бути складений певний графік. Такий графік являє собою перелік заданих періодичних оглядів, метою яких є виявлення елементів, що відмовили в резервованій системі, оскільки відмови цих елементів можуть пройти непоміченими, якщо не передбачити спеціальні засоби для їх виявлення. Елементи, що відмовили, повинні бути замінені або відремонтовані для відновлення заданого рівня надійності системи. Час, необхідний для таких замін або ремонтів, може бути підрахований і виражений в людино-годиннику або просто в годиннику; воно може бути наперед враховано як додатковий час до заданих часів, передбачених для обслуговування типів 1 і 3.

Що стосується періодичності позапланового обслуговування, то вона строго залежить від інтенсивності відмов під час експлуатації елементів або блоків, що викликають відмову системи, і, отже, є функцією величини, зворотній середньому напрацюванню на відмову системи *m*.

Для кожного часу роботи системи, що дорівнює *t*, існує середня кількість *t*/*m* відмов під час експлуатації системи, і, отже, є середня кількість *t*/*m* позапланових обслуговувань. Число людино-годин, необхідних відновлення, залежить у разі від кількості елементів, викликають відмови. Значення *t*/*m* може бути розкладено на *t*/*m*1, *t*/*m*2, *t*/*m*3 і т. д., тобто на кількість заходів з обслуговування, які повинні виконуватися над окремими елементами та блоками із середніми напрацюваннями на відмову *m*1, *m*2, *m*3 і т. д. Загальна середня кількість позапланових заходів з обслуговування для напрацювання *t* системи визначається в цьому випадку як:

 (16.1)

Якщо відомо, що час у людино-годинах, необхідне відновлення системи при відмові, викликаному елементом 1 (з середнім напрацюванням на відмову *m*1), дорівнює *Т*1; з урахуванням можливих про «вторинних» відмов, а елемента 2 цей час одно *Т*2 тощо. буд. то загальне середнє число людиногодин *Н0* позапланового обслуговування кожної напрацювання t системи становить:

 (16.2)

Окремі часи *Тi*, що являють собою часи, необхідні для відновлення системи в кожному окремому випадку, залежать від фізичного розміщення та розрахункових характеристик елементів системи, включаючи доступність, монтаж елементів та засоби, передбачені для виявлення елемента, що відмовив. Час *Тi* збільшується, якщо ремонт виконується недосвідченим персоналом. У цьому випадку значення *Тi* слід помножити на деякий коефіцієнт, більший за одиницю. Цей коефіцієнт можна визначити як величину, *обернену ефективності роботи або досвідченості обслуговуючого персоналу*.

Якщо припустити, що *Н0* (16.2) виражає повний середній час у людино-годинах, необхідне для позапланового обслуговування системи, що виконується персоналом з певним досвідом, і що в обслуговування входить виявлення пошкодження перед ремонтом і наступна перевірка, то *Н0* можна перетворити в повний час у годинах *Т0* відповідно до наявної робочої сили. Якщо цей час *Т0* скласти з повним часом *Т*проф, необхідним для профілактичного обслуговування системи, ми отримаємо повний час обслуговування в годиннику *Т*обсл, яке витрачається в середньому на кожні *t* годин роботи системи:

 (16.3)

Величина *Т*обсл є функціональним часом простою системи. З урахуванням часу простою *Т*прост, в яке входять заплановані періоди простою протягом часу роботи *t* системи або інші заплановані часи, наприклад, адміністративний час і т. д. отримуємо коефіцієнт використання системи:

 (16.4)

Чисельник у цій формулі є очікуваним часом роботи із загального календарного часу , який стоїть у знаменнику. Зазвичай як загальний календарний час вибирають один рік або 8760 годин.

Важливим фактором, що визначає максимально можливе використання системи, є повний час обслуговування, або функціональний час простою,  для напрацювання системи *t* годин. Отже, максимально можливий коефіцієнт використання системи дорівнює

 (16.5)

Для збільшення цього коефіцієнта необхідно на етапі проектування передбачити зменшення *Т*обсл. Це може бути досягнуто декількома шляхами: збільшенням середнього напрацювання на відмову системи, завдяки чому зменшиться кількість відмов під час експлуатації (16.1) та шляхом зменшення величин *Т*i (16.2). В результаті цього зменшиться число людино-годин *Н*0 і час *Т*0, необхідне позапланового обслуговування. Найбільш ефективно зменшення величини *Т*i для елементів з найменшим середнім напрацюванням на відмову *m*i. Це означає, що необхідно розташовувати такі елементи в системі так, щоб до них було полегшено доступ, а монтаж забезпечував би їх швидку заміну. Крім того, коли це можливо, слід використовувати елементи зі зниженою інтенсивністю відмов або полегшені режими роботи, оскільки будь-яке зменшення інтенсивності відмов елементів, так само як і часу заміни елементів *Т*i, призводить до зменшення повного часу позапланового обслуговування *Т*0 системи.

Що стосується часу *Т*проф запланованого регулярного обслуговування, то його можна зменшити шляхом використання герметизованих елементів з автоматичним мастилом, що точно витримують допуски при експлуатації і володіють великою середньою довговічністю і, можливо, меншим відхиленням довговічності від середнього значення. До елементів, що потребують безперервного обслуговування або частої заміни через високу швидкість зношування, повинен бути забезпечений простий доступ.

Там, де використовується навантажений резерв, сума інтенсивностей відмови елементів визначає кількість необхідних заходів з обслуговування. Якщо розглянути два елементи, включені паралельно, з однаковою інтенсивністю відмов λ, середнє напрацювання на відмову такої системи становитиме 3/2 λ. Отже, відмови системи будуть мати місце в середньому по одному на кожен інтервал часу 3/2 λ роботи, якщо при відмові одного з двох елементів заміна не проводиться, тобто якщо система повинна працювати доти, доки не відмовлять обидва елементи.

З іншого боку, якщо середнє напрацювання на відмову одного елемента дорівнює 1/λ, то при включенні двох елементів паралельно число відмов елементів становитиме одну відмову на кожні ½ λ, години роботи системи за умови, що елемент, що відмовив, негайно замінюється, тобто що обидва елементи завжди перебувають у роботі. При негайній заміні резервованих елементів, що відмовили, можуть бути створені системи із середнім напрацюванням на відмову, близьку до нескінченності.

Якщо одноразово резервована система спроектована так, що «справний» елемент може продовжувати працювати під час заміни елемента, що відмовив - за умови, що немає необхідності переривати роботу системи протягом операцій із заміни елемента, – можна домогтися того, що надійність зовсім не залежатиме від напрацювання *t* системи. Припустимо, що для заміни резервного елемента, що відмовив, потрібен невеликий період часу τ. Якщо справний елемент продовжує працювати в процесі заміни, система з навантаженим резервом може відмовити тільки в тому випадку, якщо елемент, що працює, також відмовить протягом малого часу τ. Імовірність цієї події дорівнює 1-*е*-λτ, і коли τ стає нескінченно малим, зазначена ймовірність прагне до нуля, тобто якщо заміна теоретично відбувається миттєво, система ніколи не відмовить.

Хоча припущення про миттєву заміну елемента нереально, системи можуть бути спроектовані так, що вони будуть продовжувати працювати під час заміни резервованих елементів, що відмовили, і τ можна зробити дуже малим за рахунок застосування блокових або аналогічних конструкцій і безвідмовних контрольних схем. Надійність такої дубльованої системи з навантаженим резервом означає в цьому випадку ймовірність того, що працюючий елемент не відмовить за час τ, що вимірюється з моменту відмови іншого елемента до його заміни, тобто:

 (16.6)

Таким чином, надійність системи дійсно стає незалежною від напрацювання *t* системи та визначається лише коротким часом заміни τ.

Якщо три елементи складають систему з навантаженим резервом і для її роботи потрібен лише один справний елемент, то надійність системи дорівнює:

 (16.7)

і знову залежить від напрацювання системи. Таким чином, для всіх практичних цілей такі системи можна розглядати як абсолютно надійні, коли період малий.

Доцільність застосування таких систем, надійність яких залежить від напрацювання системи, очевидна у випадках, коли особливо важлива безперервна робота. Це один із шляхів вирішення проблеми надійності життєво важливої апаратури, безперервна та безвідмовна робота яких є абсолютно обов'язковою.

Очевидно, що система, надійність якої не залежить від напрацювання, вимагає контролю та обслуговування у процесі експлуатації. Для забезпечення швидкого ремонту елемента, що відмовив, доводиться розташовувати необхідною кількістю запасних частин або ремонтного інструменту, або того й іншого одночасно. Число очікуваних операцій планового обслуговування залежить від напрацювання і від надійності елементів, що застосовуються. Оскільки відсутня профілактична заміна елементів і вони експлуатуються, доки не відмовлять, тобто забезпечено їх максимально можливе використання в умовах зносу, середнє напрацювання на відмову для такого елемента визначається за формулою:

 (16.8)

де *L*(*t*) поставлено. За таких умов, крім раптових відмов, слід враховувати відмови через знос. Знаючи величину *m* для елемента, можна підрахувати середню кількість заходів обслуговування кожного елемента протягом тривалого періоду експлуатації системи. З урахуванням ймовірності того, що кількість відмов елементів насправді може перевищувати середнє значення, можна визначити оптимальну кількість запасних частин або видів ремонтних наборів (інструментів).

Коли обслуговування експлуатованої системи та використання засобів виявлення пошкоджень елементів практично неможливі, елементи резервованої системи слід періодично перевіряти, щоб переконатися, що жоден з елементів не відмовив і що забезпечена необхідна надійність системи. Такі перевірки іноді проводяться щоразу після того, як система пропрацює t годин, а в деяких випадках після п операцій, тобто після *T*=*nt* годин. Припустимо, що група паралельно з'єднаних елементів становить частину складнішої системи, яка повинна мати надійність *R*ст(*t*) протягом часу *t* годин, і відповідно до цієї вимоги надійність групи паралельно з'єднаних елементів протягом того ж періоду *t* годин повинна дорівнювати *R*пар(*t*). Відомо, що надійність такої групи, що складається з однакових елементів, дорівнює 1-[*Q*(*t*)]n, однак це справедливо, тільки якщо до початку періоду роботи тривалістю *t* всі справні справи. Для цього необхідно перевіряти групу з паралельним з'єднанням елементів перед кожним включенням у роботу та замінювати ті з паралельно включених елементів, які могли відмовити протягом попередньої роботи.

Якщо перевірка або заміна не проводиться, то наступний період роботи *t* можна почати за наявності одного або декількох елементів, що відмовили з цієї трупи. Це може пройти непоміченим, поки останній з елементів не відмовить. Однак кожна відмова елемента в цьому випадку зменшує надійність групи, а отже, і надійність системи. Тому, якщо потрібно, щоб система мала задану надійність, рівну *R*ст(*t*) при кожному наступному включенні в роботу, а перевірка групи паралельно з'єднаних елементів запланована тільки через кожні *T*=*nt* годин, тобто після кожних п операцій системи, група елементів повинна бути розрахована на надійність *R*пар(*t*), тому що тільки в цьому випадку очікується, що система матиме необхідну надійність *R*ст(*t*) при виконанні будь-якої операції протягом *t* годин. З іншого боку, якщо перевірка виконується після кожної операції, група з паралельним з'єднанням елементів може проектуватися на надійність *R*пар(*t*). Це ілюструється мал. 19.

|  |
| --- |
| Мал. 19. Надійність контрольованої резервованої системи.  1 – мінімальна кратність резервування; 2 – велика кратність резервування. |

Середня кількість елементів, які мають бути замінені в групі з паралельним з'єднанням протягом тривалого. періоду роботи, наприклад, протягом 1000 операцій тривалістю *t* годин кожна, можна знайти шляхом розкладання в ряд бінома (*r*+*q*)n для групи з *n* елементів, де *r* і *q* – відповідно надійність і ненадійність одного елемента протягом періоду роботи між двома перевірками , який може дорівнювати *t* або *Т* = *nt*. Методика обчислення середньої кількості елементів, що відмовили, наведена вище, в лекції 11. З її допомогою можна також підрахувати середню кількість перевірок, при яких не потрібно обслуговування, якщо жоден з паралельно з'єднаних елементів не відмовив, і середня кількість перевірок для випадку виявлення одного або кількох відмовилих елементів. Після підсумовування виходить середня кількість елементів, що підлягають заміні групи з паралельним з'єднанням. Це дає можливість планувати число елементів, яке слід мати на складі, враховуючи при цьому ймовірність того, що в даний час дійсна кількість відмов може перевищувати середнє. Крім того, це дозволяє також підрахувати трудомісткість обслуговування, яке потрібно протягом заданого часу.

Розглянемо, наприклад, групу, що складається з трьох однакових паралельно з'єднаних елементів, які перевіряються через кожні *Т* годин. Нехай надійність елемента дорівнює *r* протягом часу роботи *Т*, яке ненадійність – *q*. Після розкладання в ряд бінома для такої групи отримуємо:



Для великого числа *n* перевірок можна було б очікувати, що при *r*3*n* перевірках не буде виявлено елементів, що відмовили, при 3*r*2*qn* перевірках буде виявлено один відмовив елемент, при 3*rq*2*n* перевірках будуть виявлені два відмовили елементи, а при *q*3*n* перевірках відмовить вся група, тобто. всі три елементи. Середня кількість *N* елементів, що відмовили, які повинні бути замінені за *n* перевірок, буде в цьому випадку дорівнює:

 (16.9)

Якщо число людино-годин, необхідне для заміни одного елемента, що відмовило, дорівнює *h*1, то загальна кількість людино-годин, необхідних для заміни всіх елементів, що відмовили протягом *n* перевірок, складе:



Якщо *h*2 – час, що витрачається на кожну перевірку, то для *n* перевірок потрібно *nh*2 людино-годин. Тоді сумарна середня кількість людино-годин, необхідне для обслуговування, що складається з перевірок, дорівнює:

 (16.10)

Цей розрахунок справедливий, коли надійність елементів не змінюється в залежності від часу експлуатації.

Коли кілька операцій з обслуговування виконуються в системі одночасно всім обслуговуючим персоналом і всі ці роботи починаються в той самий час, період обслуговування в годинах, необхідний для відновлення системи, визначається найдовшою операцією. І тут короткочасні роботи взагалі враховуються щодо тривалості простою. Проте число людино-годин, необхідне проведення окремої операції, дуже важливо. оскільки воно є мірилом оцінки загальних витрат на обслуговування; воно дає можливість планувати оптимальну кількість робочої сили та дозволяє встановити оптимальні плани обслуговування, завдяки чому вдається звести час обслуговування до мінімуму.

Для отримання Правильного співвідношення між часом обслуговування та напрацюванням системи, а отже, і між обслуговуванням та надійністю необхідно знати середню функціональну тривалість простою системи, тобто середній час обслуговування.

Вище вже було показано, що середня кількість затрачуваних на обслуговування людино-годин, що залежить від відмов системи під час роботи і від відмов елементів у резервованих системах, може бути обчислено з надійностей елементів, що входять в систему, а середня тривалість простою – за планами обслуговування. Різні способи складання таких оптимальних планів не входять до кола питань, що розглядаються у лекціях.

З формули (16.5) визначається максимально можливий коефіцієнт використання системи *U*макс=*t*/(*T*обсл+*t*). Цей коефіцієнт є мірою готовності системи, оскільки він дає час (в %), протягом якого система готова до використання. Було показано, що для роботи системи протягом *t* годин із загального часу *T*обсл+*t* годин необхідно відвести *T*обсл годин для планового та позапланового обслуговування. Приймемо в якості масштабу середнє напрацювання на відмову *m*. Оскільки при оцінці коефіцієнта використання системи як *T*обсл+*t* вибирають один рік, тобто 8760 годин, то середній час обслуговування  на напрацювання т системи дорівнює:

 (16.11)

де *m* – середнє напрацювання на відмову системи для заданої практики обслуговування, а *T*обсл – тривалість простою системи на рік. Якщо тепер у вираженні для коефіцієнта використання замість *t* і *T*обсл скористатися величинами *m* і , ми знайдемо величину, чисельно рівну *U*макс, яку за визначенням назвемо *коефіцієнтом готовності системи*:

 (16.12)

Максимальне значення *А*=1 досягається лише у випадках, коли система не вимагає обслуговування, і, отже, якщо *T*обсл=0. Величина А є відношенням напрацьованих системою годин до суми годин напрацювання та обслуговування системи. Коефіцієнт готовності системи є ймовірністю того, що система із середнім напрацюванням на відмову, що дорівнює *m*, що вимагає часу обслуговування  для кожного напрацювання *m* буде готова до експлуатації в будь-який заданий момент часу в майбутньому. Можна ввести додатково ймовірність *B*, що визначається співвідношенням *А*+*В*=1, де *В* – ймовірність того, що система не буде готова до дії. Ця ймовірність, звана *коефіцієнтом неготовності системи*, дорівнює:

 (16.13)

Якщо підставити цю формулу замість  тривалість простою *T*обсл протягом року, отримаємо коефіцієнт готовності системи як:

 (16.14)

а коефіцієнт неготовності:

 (16.15)

Іноді потрібно знати ймовірність того, що система буде готова до дії між двома плановими обслуговуваннями, наприклад коли система призначена для постійної роботи, причому може знадобитися включення в будь-який момент часу, або вона повинна працювати без перерв. Ця можливість *D* називається *коефіцієнтом готовності системи без урахування профілактичного обслуговування*. Він вводиться так само, як і коефіцієнт готовності системи у формулі (16.14), з тією лише відмінністю, що з *T*обсл в (16.3) віднімається член *Т*проф, що є середнім часом планового обслуговування, і розглядається тільки член *Т*0 – середній час позапланового обслуговування за рік. Тоді коефіцієнт готовності без урахування профілактичного обслуговування системи виражається у вигляді:

 (16.16)

Величина *Т*0 може бути отримана з формули (16.2), яка дає середню кількість людино-годин позапланового обслуговування *Н*0 за час роботи *t* системи функції надійностей елементів. З величини *Н*0 можна отримати *Т*0 для певного складу персоналу та заданого плану обслуговування. З (16.2) насамперед отримуємо число людино-годин позапланового обслуговування, необхідних на 1 годину роботи системи:



Ця величина перетворюється на величину ρ=*T*0/*t*, яка є тривалістю позапланового обслуговування на 1 годину роботи системи. Тоді коефіцієнт готовності системи без урахування профілактичного обслуговування може бути виражений так:

 (16.17)

В якому б вигляді не використовувався цей коефіцієнт, головним завданням завжди є виконання аналізу обслуговування системи, в результаті чого можна підрахувати *Н*0 для напрацювання *t* системи, або *Н*0/*t* на 1 годину, що пропрацювала.

# Лекція 17. ОБЛІК НАДІЙНОСТІ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ

Надійність була визначена як ймовірність виконання пристроєм своїх функцій відповідно до вимог, що пред'являються протягом заданого часу за певних умов роботи. Під надійністю розуміють задовільне виконання заданих функцій і, крім того, додаткове забезпечення ще двох вимог – задані характеристики повинні бути незмінними протягом встановленого періоду часу під час роботи в певних умовах зовнішнього середовища і має бути забезпечена ймовірність (зазвичай дуже близька до одиниці) того, що апаратура не відмовить у заданий період.

Таким чином, конструктор стикається з двома завданнями – спроектувати апаратуру із заданими характеристиками, що означає спроектувати її так, щоб вона виконувала функції, для яких вона призначена, і спроектувати її надійно – так, щоб вона не відмовила в процесі експлуатації.

Кожен конструктор знає, що є кілька напрямів проектування апаратури чи системи із заданими характеристиками. Однак вибір напрямку проектування утруднюється, коли потрібно знайти рішення, що задовольняє одночасно вимоги до надійності та вимог до характеристик. Зазвичай один певний варіант виявляється надійнішим, ніж решта можливих.

Конструктору, який має забезпечити задані вимоги до надійності, у процесі проектування доводиться оцінювати низку варіантів задля забезпечення необхідних характеристик. Природно, що забезпечення необхідних характеристик апаратури, що проектується, є головним завданням, яке має бути вирішено в першу чергу. Якщо вимоги до характеристик не можуть бути задоволені, немає сенсу гаяти час на вирішення будь-яких інших завдань. Однак зазвичай вимоги до характеристик можуть бути задоволені, тому конструктор повинен обміркувати різні варіанти, якими це може бути забезпечено. На цьому етапі, перш ніж обраний один певний варіант, попередній аналіз надійності може дати правильне уявлення про те, який з можливих варіантів забезпечить найвищу власну надійність апаратури або дозволить виконати вимоги до надійності найпростішим шляхом. Тоді має бути обраний саме цей остаточний варіант конструкції. Така концепція проектування, незважаючи на те, що вона вимагає особливо ретельного продумування на початковому етапі, виправдовує себе більш ніж будь-яка інша. У результаті такого підходу досягається економія часу та коштів, і його можна вважати вирішальним під час укладання контрактів та оцінки можливостей збуту апаратури.

При проектуванні надійності ніколи не можна задовольнятися жодним знайденим рішенням. Перше рішення, що прийшло в голову, може бути самим ненадійним з ряду можливих варіантів або найбільш важко реалізованим. Тут потрібно насамперед критичне ставлення до власних рішень та оцінка різних можливих варіантів. Якщо спочатку бачиться лише одне рішення, то при поглибленому дослідженні проблеми дуже скоро виявляється ще кілька варіантів, і при виборі того чи іншого з них, як найбільш надійного, не слід керуватися тим, що називають інтуїцією. Тільки імовірнісний аналіз здатний забезпечити правильний вибір, і при цьому варіант, інтуїтивно обраний як найбільш надійний, може виявитися найменш надійним або найважчим для реалізації. Слід добре запам'ятати, що коли мають справу зі складними ймовірностями (а надійність – це поняття особливо складної природи), зазвичай повністю виключають інтуїцію.

Чи матиме апаратура задану величину надійності – в основному визначається на етапі проектування. Проектування на задану величину надійності, зокрема при створенні складної апаратури, вимагає, щоб програма контролю надійності ретельно здійснювалася на всій стадії проектування, а за нею – на стадіях випробування першої моделі та виробництва.

Мета такої програми контролю на стадії проектування – перевірити успішність розрахунку на певних етапах проектування та гарантувати, що при цьому враховано вимоги надійності. Програма контролю надійності наново складається кожного конкретного випадку залежно від складності проектованої апаратури.

Перший етап – попередній аналіз надійності різних пробних конструкцій, у результаті якого вибирається остаточний варіант.

Коли детальне проектування закінчено, розпочинається другий етап програми контролю за надійністю. Він полягає в аналізі надійності остаточного варіанта конструкції і повинен дати впевненість у тому, що у цій конструкції задоволені всі вимоги до надійності.

Третій етап програми контролю надійності полягає у випробуванні перших дослідних зразків та у зіставленні отриманих даних з результатами аналізу на другому етапі. Якщо є хороший збіг результатів, немає необхідності змінювати конструкцію, і зразок йде у виробництво. Якщо збіг незадовільний, може знадобитися зміна конструкції критичних ділянок, в яких у зразків, що випробовувалися, відзначена тенденція до відмов. Чим ретельніше було виконано аналіз першому і другому етапах, тим менш ймовірна необхідність зміни конструкції.

Попередній аналіз надійності на першому та другому етапах застосовується як при замовленні нової апаратури, так і при модернізації старих зразків. Він полягає в теоретичному порівняльному аналізі різних можливих варіантів та альтернативних рішень, пропонованих конструкторам як пробні підходи. Аналіз схем і навантажень, що виконується при цьому, допомагає вибрати інтенсивності відмов елементів для аналізу загальної надійності. Потім складаються блок-схеми надійності для різних варіантів, що показують, де використовується послідовне з'єднання елементів, а де резервування, і відповідно до заданих вимог обчислюється надійність *R*(*t*) апаратури протягом інтервалу часу *t*, необхідного для виконання заданої функції, або її середня напрацювання па відмова *m*. Інтенсивності відмов елементів для обчислених рівнів навантаження визначаються за кривими залежності інтенсивності відмов елементів від значень номіналів або видаються службою надійності фірми. Час, протягом якого елементи включені, також враховується, якщо вона відрізняється від напрацювання апаратури. Методика аналізу надійності докладно викладена у попередніх лекціях.

Очевидно, що на етапі попереднього аналізу надійності можлива і здійсненна тільки груба оцінка інтенсивностей відмов елементів. Як було зазначено вище, метою цього попереднього аналізу є порівняння різних рішень та вибір остаточного варіанта при проектуванні.

Результати попереднього аналізу з успіхом використовуються як рекомендації на етапі остаточного проектування. Чисельний аналіз обраної структури схеми показує, де можливі слабкі місця, де необхідно зменшити навантаження на елементи і яка має бути якість елементів, що не використовуються.

Після завершення остаточного проектування розпочинають другий етап аналізу надійності. На цьому етапі аналіз вже є суто теоретичним завданням, оскільки остаточна структура схеми або план розміщення елементів тепер відомі та вже обрані чи спроектовані конкретні типи елементів. Тепер можливий значно точніший аналіз схем та навантажень, і для цієї мети використовуються криві інтенсивностей відмов для певних видів елементів, отримані від їх виробників. Незважаючи на те, що аналіз надійності на другому етапі грає більш важливу роль, ніж на першому, від першого етапу також не можна відмовлятися, тому що в результаті такого аналізу отримують інформацію, яку враховують при остаточному проектуванні.

Аналіз на другому етапі найчастіше складається з двох стадій: розрахунку схем та компонування елементів. При компонуванні зазвичай визначаються навантаження на елементи, зумовлені довкіллям, включаючи підвищення температури, під впливом яких сильно зростають інтенсивності відмов. При проектуванні методів компонування слід враховувати також ремонтопридатність. Якщо апаратура повторно використовується або ремонтується, найбільш легкий доступ повинен бути забезпечений до елементів з максимальною інтенсивністю відмов. За наявності всіх конструктивних даних, включаючи результати аналізу схем та навантажень, типи елементів та їх розміщення, може бути отримана точна оцінка надійності апаратури. Якщо отримана оцінка перевищує (в розумних межах) необхідну надійність, то може бути розпочато виготовлення зразка. Якщо ж оцінка покаже, що надійність не вища за потрібну величину, то може виявитися необхідним змінити конструкцію або компонування для зменшення навантажень, що впливають на ряд елементів, – покращити захист цих елементів, тепловідведення та охолодження або змінити розміщення елементів так, щоб в результаті розраховане значення надійності виявилося більше за необхідну величину.

Враховуючи одночасно вплив першого та другого етапів програми контролю надійності, стає очевидним, що вже на стадії проектування можна досягти значного підвищення надійності ще до того, як буде розпочато виготовлення зразка. На цих етапах вибирають варіант, найбільш вдалий з точки зору забезпечення надійності, отримують дані для остаточного проектування та визначення ділянок, де необхідні особливі заходи для запобігання перевантаженню елементів або де потрібно застосувати резервування, досліджують надійність монтажу з урахуванням ремонтопридатності, вибирають та уточнюють розумні номінали для показників елементів. Таким чином можна забезпечити оптимальне проектування, хоча очікувані навантаження на окремі елементи можуть бути оцінені лише дуже грубо. Проте це найкраще, що може бути зроблено на стадії проектування, і якщо розумно здійснити таку програму контролю надійності, наступні етапи викличуть дуже мало труднощів.

Реальні фізичні навантаження – електричні, механічні та теплові – стають відомими лише після того, як будуть виготовлені та випробувані зразки. Ці випробування є частиною третього етапу програми контролю за надійністю. За своїм характером ці випробування відносяться до статистичних випробувань надійності і завдання їх полягає в тому, щоб перевірити, чи надійність зразка відповідає величині, що передбачається попереднім аналізом. Чинники, невраховані під час проектування та аналізу, можуть виявитися під час випробувань. Цей етап може проводитись у вигляді прискорених випробувань, що викликають відмови, для яких одержують статистичну оцінку, яку порівнюють з результатами попередніх етапів аналізу надійності.

В результаті третього етапу програми контролю надійності можуть знадобитися зміни у схемі з'єднання, розміщення елементів або їх компонування, а іноді необхідна заміна елементів більш високоякісні. Однак при правильному проведенні першого та другого етапів програми контролю надійності знадобляться лише незначні зміни, якщо такі взагалі потрібні. Принаймні повністю змінювати конструкцію безумовно вже не доведеться, і виключена можливість випуску виробів, ненадійність яких буде виявлена ​​тільки після того, як вони відмовить в експлуатації.

Перший та другий етапи програми контролю дають упевненість у тому, що проектування ведеться у правильному напрямку, а третій етап підтверджує це. Надійність апаратури визначається її конструкцією і може бути внесена в апаратуру у процесі випробування.

Конструкція визначає частоту раптових відмов і довговічність апаратури, отже, і інтенсивність зносових відмов. Таким чином, виявляється, що конструктор вирішує, як часто відмовлятиме апаратура. Це особливо справедливо у випадку, коли з боку замовника не висунуто конкретних кількісних вимог до надійності. Якщо такі вимоги задані, то відповідальність із конструктора в основному знімається. Все, що він повинен зробити, - це створити таку конструкцію апаратури, інтенсивність відмов якої в експлуатації не перевищувала б необхідного рівня. Але і в цьому випадку, якщо це можливо, повинна бути створена така апаратура, яка була б надійнішою, ніж потрібно, особливо в тому випадку, коли відмова апаратури може призвести до втрати всієї системи, в якій вона застосовується (наприклад, у літаку , де це може викликати загибель людей, що знаходяться на борту).

Таким чином, конструктор повинен мати високе почуття відповідальності за забезпечення надійності і ніколи не повинен ставитися до цього питання зневажливо. Це не додаткова прикра незручність, а найважливіша частина його роботи. Природно, конструктор може проводити таку лінію тільки за всілякою підтримкою керівництва, відповідального за надійність, яке має йому надати всі необхідні засоби для роботи в галузі надійності, тобто створити таку службу надійності, при якій конструктор буде забезпечуватись усіма необхідними даними та мати своєму розпорядженні відповідні методи, причому йому буде забезпечена належна допомога на всіх етапах програми контролю надійності для кожного виробу, що проектується. Незважаючи на те, що творцем надійності є конструктор, він не може один виконати всю необхідну роботу. Йому необхідна підтримка з боку організації, яка відає надійністю, яка повинна забезпечити його необхідними даними про елементи і в будь-який момент виконати для нього ймовірні розрахунки, особливо коли проект повинен бути завершений до певного терміну. Проте кожен конструктор повинен мати достатні знання в області надійності, тому що саме він синтезує апаратуру або систему з елементів, що надає вирішальний вплив на її надійність. Він вибирає остаточні конструктивні рішення, лише зваживши всі надійнісні аспекти того чи іншого завдання.

Найважливішим моментом за будь-якого розрахунку надійності системи є отримання достовірних даних про інтенсивність відмов, які у ній елементів. Ці дані суттєві для належного вибору елементів та проведення аналізу надійності на реальній основі. Часто запитують, як отримати достовірні дані, і часом це серйозна проблема.

На першому етапі, під час попереднього аналізу надійності, коли ще не вибрані елементи певного типу, можуть бути використані так *звані загальні інтенсивності відмов*, оскільки на першому етапі аналіз є лише порівняльним і служить для визначення відносних значень надійностей для ряду можливих варіантів конструкцій та виявлення порівняно слабких з погляду надійності ланок у тому чи іншому варіанті. Багато фірм мають свої таблиці середніх інтенсивностей відмов елементів, що використовуються цими фірмами під час проектування та складені з урахуванням досвіду минулих років, підданого статистичної обробці. Така інформація часто цілком прийнятна для порівняльного аналізу надійності, особливо коли є аналогія в режимах роботи. Слід рекомендувати практику складання таких переліків середніх інтенсивностей відмов, які визначаються підсумовуванням напрацювань всіх елементів пристрою та поділу отриманого значення на кількість відмов, зафіксованих за цей період часу.

Наприклад, якщо апаратура складається з 10 елементів заданого типу і 20 комплектів такої апаратури було передано замовнику рік тому, а інші 20 – через шість місяців, причому відомо, що апаратура (встановлена, наприклад, на літаку) працювала в середньому по 300 годин на місяць , можна оцінити середню інтенсивність відмов цих елементів в такий спосіб. У перших 20 комплектах є 200 елементів заданого типу. За 12 місяців вони напрацювали 12х300х200 = 720000 елемент-годин. Елементи в комплектах, переданих замовнику пізніше, у сумі напрацювали 6х300х200 = 360000 елеміто-годин. Всі елементи в сумі напрацювали 1080000 елемент-годин. Якщо за весь цей річний пернод замовник повідомив про 7 відмов елементів, то середня інтенсивність відмов цих елементів буде близько 7:1 080 000 ~ 10-5 год-1.

Таким шляхом може бути складена таблиця інтенсивностей відмов для елементів різних типів та різної технології виготовлення. Це прийнятно головним чином для елементів, що найчастіше застосовуються при проектуванні; отже, експериментальні дані для цих елементів можуть бути накопичені в результаті спостережень за поведінкою апаратури в експлуатації або на основі інформації, отриманої від замовника, у якого зазвичай ведеться журнал відмов (як це має місце в аерофлоті). Такі таблиці інтенсивностей відмов дуже корисні під час аналізу надійності аналогічних пристроїв, проектованих для подібних експлуатаційних умов.

Аналіз надійності на другому етапі потребує більш точного підходу. Звичайно, точно обчислити інтенсивність відмов можна тільки після випробування дуже великої кількості зразків заданих елементів при таких же навантаженнях, як ті, які будуть впливати на елементи, коли апаратура буде введена в експлуатацію. Випробування у такому великому масштабі для замовників практично неможливі. Однак виробник елементів повинен випробовувати елементи, що випускаються ним, щоб дізнатися, яка їх якість і що він поставляє. Отже, відразу ж після вибору типів елементів для остаточного розрахункового варіанта у виробників елементів слід запитати дані про інтенсивність відмов цих елементів. На практиці це зводиться до необхідності отримання даних, на підставі яких можуть бути побудовані приблизні криві інтенсивностей відмов, або безпосередньої вимоги надати обґрунтовані криві інтенсивностей відмов при відхиленнях від номіналів. Для того, щоб вся ця інформація була надійною, вона має бути, звичайно, підкріплена завіреними актами випробувань. Від виробника елементів не вимагається надзвичайних зусиль для надання такої інформації. Кожен виробник елементів має випробувальну апаратуру, і його завдання зводиться до проведення регулярних випробувань на надійність для трьох випробувальних точок, як зазначено в лекції 15. Слід запам'ятати хороше правило, що надійніше купувати елементи у виробників, які видають результати випробувань на надійність ніж елементи, які ніколи не випробовувалися на надійність.

Мінімальна інформація про властивості елементів заданого типу та певного способу виготовлення, яку необхідно мати, повинна містити вказівки на номінальну інтенсивність відмов при роботі на номінальних значеннях потужності, напруги тощо.

Якщо така інформація є, оцінки більш низьких навантажень можуть бути обчислені на основі законів відхилення від номіналів, описаних у лекції 15.

При розрахунку надійності на другому етані необхідно також точно оцінити навантаження, які впливатимуть на елементи у працюючій апаратурі. Електричні навантаження можуть бути обчислені на підставі аналізу електричних схем, теплові навантаження - на підставі аналізу температурного режиму і т. д. Проте дуже важко точно оцінити, наприклад, температуру, при якій елемент буде працювати після його монтажу в заданому місці, включаючи підвищення температури елемента якщо в ньому відбувається розсіювання тепла. Зазвичай у разі можуть бути отримані лише грубі оцінки, використовувані потім визначення інтенсивностей відмов елементів по кривим відхилення від номіналів.

Після цього починається третій етап програми контролю надійності, тому що під час випробувань з моделюванням режиму можна створити приблизно такі ж навантаження на елементи, як ті, які впливають на них в експлуатації. Електричні параметри можуть бути виміряні, збільшення температури визначено за допомогою термометрів та термопар, внаслідок чого можуть бути обчислені інтенсивність відмов елементів. Дуже корисні також дані про відмови у процесі випробувань, особливо при прискорених випробуваннях. З цих даних у разі потреби вносяться зміни у конструкцію ще до того, як розпочато виготовлення апаратури. Тоді можна бути впевненим у тому, що у виробництво буде пущено продуману, надійну конструкцію, яка згодом не викличе розчарування та фінансових втрат.

Іншою особливістю, яку слід враховувати під час проектування електронної апаратури, є догляд параметрів елементів. Це типове явище, викликане зношуванням, означає, що деякі електронні елементи починають зношуватися досить рано, хоча догляд параметрів відбувається порівняно повільно. Зазвичай потрібен тривалий час, щоб параметри елемента вийшли за межі допустимих значень. Чим ширші задані межі допусків, тим довший період, протягом якого елемент може працювати, тобто. тим згодом відбудеться відмови від догляду параметрів за допустимі межі. Ця перевага враховується під час проектування надійних електронних схем. Статистичні методи, широко освітлені в літературі, можуть бути застосовані для проектування схем, що витривали з точки зору догляду параметрів елементів.

Відхід параметрів ряду елементів, таких, як опори, конденсатори тощо, не впливає на інтенсивність раптових відмов елементів або систем і, отже, безпосередньо не впливає на надійність апаратури; Необов'язково догляд параметрів зменшує і міцність застосовуваних елементів. Проте він впливає характеристики електронної апаратури, викликаючи поступове зниження якості її. Догляд параметрів під впливом зношування елементів зазвичай має безперервний характер. Іншого типу догляд параметрів виникає через вплив температури і зазвичай є процесом, що самовідновлюється. При відновленні попереднього рівня температури параметри елементів набувають своїх колишніх значень. Обидва види догляду параметрів мають в основному однаковий вплив на характеристики схеми. Отже, при розрахунку характеристик електронних схем ці відходи параметрів мають бути враховані.

При проектуванні конструктор має у своєму розпорядженні два потужні засоби, один з яких – аналіз надійності на всіх етапах проектування, а інше – зменшення номіналів і, отже, полегшення режимів роботи.

Аналіз надійності полягає в розрахунку надійності систем або елементів інтенсивності відмов застосовуваних елементів. Конструктор використовує поєднання елементів, що забезпечують необхідні характеристики, але він повинен вибрати найбільш ефективний шлях комбінування їх для отримання необхідної надійності. При правильному використанні результатів аналізу надійності конструкція може бути виконана з модулів, вузлів, блоків або підсистем, які забезпечать задану загальну надійність.

Якщо деяким елементам притаманна недостатня надійність, слід використовувати полегшення режиму роботи. Такий спосіб при проектуванні надійності є стандартним і означає роботу елементів при половині або навіть ще меншій частці номінальних значень напруги, потужності, температури і т. д. Таким шляхом може бути досягнуто значного збільшення надійності елементів та апаратури. Іноді для того, щоб знизити інтенсивність відмов елементів до необхідного рівня, достатньо зменшити один із цих параметрів. Однак бувають обставини, коли навіть дуже сильне зменшення параметрів порівняно з номінальними не допомагає, і інтенсивність відмов елементів залишається ще надто високою. У таких випадках рекомендується застосовувати резервування – навантажене чи ненавантажене. Але при резервуванні зростають габарити та вага апаратури та, можливо, також ускладнюється її експлуатація. Отже, необхідно вжити всіх заходів для запобігання резервуванню та по можливості використовувати нерезервовані високонадійні елементи та полегшені режими роботи.

Оскільки в електронних системах елементи в більшості випадків з'єднуються послідовно з дуже незначним резервуванням або без нього, робота в полегшеному режимі абсолютно необхідна для досягнення високих надійностей. Оскільки надійність систем з послідовним з'єднанням елементів визначається сумою інтенсивностей відмов елементів, іншим потужним засобом отримання надійної системи є спрощення конструкції. Спрощення означає зменшення кількості елементів у апаратурі. Отримання необхідної характеристики з мінімальною кількістю елементів – ось правильний підхід до забезпечення надійності системи. Таким чином, мистецтво надійного проектування полягає не в проектуванні складної системи, а скоріше у проектуванні можливо більш простих систем. Не слід хвалитися складною, перевантаженою системою, що забезпечує необхідні характеристики; все мистецтво полягає в тому, щоб спроектувати найпростішу систему, що має задовільні характеристики та мінімальну ймовірність відмови.

Підсумовуючи все викладене вище, можна сказати, що конструктор має в своєму розпорядженні низку засобів для створення надійної конструкції. Він може:

1) спростити конструкцію та скоротити до мінімуму кількість деталей без погіршення характеристик;

2) перевірити надійність конструкції шляхом аналізу надійності на попередньому та кінцевому етапах проектування, а якщо необхідно, то і на проміжних етапах;

3) максимально використовувати для зменшення інтенсивностей відмов та збільшення довговічності елементів полегшення режимів за рахунок зниження робочих параметрів порівняно з номіналами;

4) зменшити робочу температуру елементів в апаратурі, передбачивши тепловідведення, відповідне компонування і, якщо потрібно, хороше охолодження;

5) усунути вібрації на резонансній частоті за допомогою гарної амортизації та захистити апаратуру від ударів, вологості, корозії тощо;

6) задати вимоги до надійності елементів та норми відбраковування;

7) встановити перелік випробувань зразка та методику припрацювання апаратури, що випускається.

Точне завдання вимог до надійності елементів, їх первинної відбраковування та припрацювання виготовленої апаратури необхідне збереження рівня надійності, закладеного при проектуванні, на стадіях виготовлення та складання. Ці вимоги змусять приймальників, інспекторів з якості та технологій внести свій внесок у загальну програму контролю надійності.

# Лекція 18. ПРИКЛАДИ АНАЛІЗУ КОНСТРУКЦІЙ

**Приклад 1.** Нехай потрібно, щоб надійність бортової системи радіозв'язку (літака) дорівнювала 99,5% для 10-годинного польоту. Система складається з приймача, блоку управління, фідера; фільтра та антени, що мають задані характеристики.

Блок-схема основної системи для розрахунку надійності показано на мал. 20. Значення інтенсивностей відмов, наведені у першій колонці, отримані на підставі попереднього досвіду. Порівнюючи умови довкілля, у яких має працювати апаратура, з умовами, котрим отримані статистичні дані, визначаємо новий ряд значень інтенсивностей відмов у другій колонці.

|  |
| --- |
| Рис. 20. Блок-схема основної системи радіозв'язкуал. 20. Блок-схема основної системи радіозв'язку |

Очікувана загальна інтенсивність відмов у системі дорівнює 0.015 год-1. Тому надійність всієї системи протягом 10-годинного періоду дорівнюватиме:



що, очевидно, менше за необхідну величину надійності.

Аналіз інтенсивностей відмов показує, що найбільше відмов дає приймач. У зв'язку з цим проводиться повторна оцінка надійності цього блоку як попереднього загального аналізу, як показано на мал. 21. Оскільки цей аналіз має попередній характер, використання середніх значень інтенсивності відмов елементів забезпечує достатнє наближення. Отже, замість детального аналізу кожного елемента виконується аналіз груп елементів. Така методика часто використовується для електронної апаратури, особливо на етапі проектування, коли є усереднені дані щодо аналогічної апаратури. У даному прикладі відомо, що аналізований приймач розрахований на роботу електронних елементів при навантаженнях, рівних 95% номінальних значень, тоді як всі інші елементи повинні працювати в середньому при навантаженнях, рівних 90% номінальних значень.

|  |
| --- |
| Мал. 21. Спрощений аналіз надійності радіопередавача |

Із заданого сімейства кривих для полегшеного режиму роботи (мал. 22), побудованих для елементів певного типу і конкретного способу виробництва та працюючих при заданій температурі 60°С, визначаємо середні значення інтенсивностей відмов елементів для заданих рівнів навантаження. Ці значення наведено на мал. 21 у першій колонці, а сумарні значення для всіх блоків приймача в цілому – у другій колонці. Загальне значення інтенсивності відмов виявилося рівним приблизно 12 на 1000 годин або 0.012 год-1. Це досить точно збігається з передбаченим значенням, що дорівнює 0.014 год-1 (див. мал. 20). Для того, щоб збільшити надійність приймача, його елементи слід перерахувати на інші номінали без погіршення їх характеристик. Можуть бути обрані елементи з підвищеними номінальними значеннями, які, отже, працюватимуть за порівняно низьких рівнях навантаження.

|  |
| --- |
| Напівпровідники Опір Конденсатори    Рис. 22. Характеристики елементів під час роботи у полегшеному режимі (для 600С) |

У третій колонці на мал. 21 наведено нові очікувані значення інтенсивностей відмов для електронних елементів, що працюють при навантаженнях 70% номінальної потужності, для опорів, що працюють при навантаженнях 50% номінальної потужності, і для конденсаторів, що працюють при навантаженнях 50% номінальної потужності. Ці значення інтенсивностей відмов також виходять із кривих на мал. 22.

Після підсумовування нових значень інтенсивностей відмов, наведених у четвертій колонці мал. 21, отримуємо загальне значення інтенсивності відмов, що дорівнює приблизно 0.009 год-1 для приймача. Це означає, що інтенсивність відмов зменшилась на 25%. Після перерахунку надійності за новим значенням інтенсивності відмов надійність усієї системи загалом виходить рівною 0.905. Це відчутне поліпшення проти колишнім значенням 0.861.

Однак така надійність ще далека від заданого рівня, що дорівнює 99.5%. Отже, необхідно зважити можливість роботи з резервуванням двох або більше блоків, включених паралельно в різних схемах, як показано на мал. 23. Початкові ділянки кривих надійності для п'яти різних схем показані на цій же фігурі зліва. Відповідні криві побудовані на підставі таких формул:



Індекс *ПП* присвоєний параметрами приймача, *А* - параметрами апаратури антени, включаючи блок управління, фідер і фільтр, *П* – параметрами антенного перемикача; *R* і *Q* – величини надійності та ненадійності відповідно.

У схемах *в*, *г* і *д* є по дві антени, які у випадках *г* і *д* можуть бути переключені на будь-який приймач.

|  |
| --- |
| Мал. 23. Порівняння надійностей різних типів системи радіозв'язку  РП – радіопередавач, А – антенний пристрій, П – антенний перемикач  Крапка на графіку вказує задану величину надійності |

Дослідження кривих надійності показує, що з розглянутих варіантів тільки випадок *д* задовольняє вимогу надійності, що дорівнює 0.995 для 10 годин.

У практичних умовах, однак, схема *д* не застосовується через вагу та габарити триблочної системи. Отже, необхідно вжити заходів до збільшення надійності схем *в* або *г* таким чином, щоб був досягнутий необхідний рівень надійності системи. Перерахунок надійності апаратури антени аналогічний попередньому перерахунку для приймача, завдяки чому необхідні результати досягаються шляхом додаткового зменшення номіналів, охолодження апаратури вентиляторами або тепловідведеннями. З кривих надійності цих двох схем видно, що отримання заданого рівня надійності не потрібно надмірних зусиль.

Обчислення, наведені у цьому прикладі, були зроблені на підставі припущення про те, що всі елементи системи перебувають у стані «включено» протягом 10-годинного періоду виконання завдання, але ця умова практично не виконується. Деякі блоки можуть використовуватися як «ненавантажений» резерв, тобто перебувають у стані «вимкнено» і включаються лише при відмові працюючого блоку. За таких умов замість обчислень для випадку навантаженого резерву, наведених у цьому прикладі, слід виконати обчислення для ненавантаженого резерву. Однак розглянутий випадок навантаженого резерву є добрим прикладом аналізу надійності на ранньому етапі проектування системи.

**Приклад 2.** На мал. 24 показані блок-схеми трьох електрогенераторних систем, що застосовуються у двомоторних літаках. Потрібно зробити попередній порівняльний аналіз надійності цих систем. Розглядаються лише основні елементи системи – двигуни, генератори, перетворювачі частоти. Генератори являють собою машини з приводом та регулюванням частоти. Вихідна напруга генератора подається в статичні перетворювачі частоти, які перетворюють змінну частоту на постійну.

Номінальна потужність перетворювачів частоти у схемі *а* дорівнює 60 кВт, а схемах *б* і *в* – 30 кВт. У конфігурації *в* середній перетворювач частоти може бути автоматично або вручну переключений на будь-який з двох генераторів. Надійності цих трьох систем порівнюються з точки зору забезпечення потужності 60 кВт у нормальних умовах та 30 кВт в аварійних умовах.

Схема *а* характеризує найпростіший випадок паралельного з'єднання. При цьому варіанті припустимо відмову тільки однієї з гілок, якщо повинні підтримуватись нормальні умови з подачею потужності 60 кВт або аварійні умови з 30 кВт. Отже, надійність подачі системою потужності 60 кВт збігається із її надійністю за аварійних умов:



де *R*Д, *R*Г та *R*ПР – надійність двигуна, генератора та перетворювача частоти відповідно.

|  |
| --- |
| Мал. 24. Варіанти системи електроживлення двомоторного літака |

У схемі *б* є два генератори на кожен двигун, і подача потужності 30 кВт в аварійних умовах забезпечується, якщо працює хоча б один з двох двигунів і принаймні одна з двох пар генератор - перетворювач частоти, що приводяться в рух двигуном, що залишився. Отже:



Надійність системи з погляду подачі потужності 60 кВт може бути обчислена шляхом послідовного застосування повної ймовірності формули (лекція 13). Наприклад, при використанні пари, генератор – перетворювач частоти в лівій частині схеми, надійність якої *R*1=*RГ*1*RПР*1 і ненадійність Q1=1- *RГ*1*RПР*1, ненадійність системи дорівнюватиме:



де ймовірність відмови системи при справності пари (*G*1, *F*1) дорівнює:



а ймовірність відмови системи, якщо пара 1 несправна:



Прирівнюючи члени *RД1*=*RД2*, *R*1=*R*2=*R*3=*R*4, отримаємо надійність системи *R*60=1–*Q*60 як:



Надійність схеми *в*, в якій на кожен двигун також припадає по два генератори, може бути знову обчислена за формулою повної ймовірності. Для обох надійностей *R*30 і *R*60 використовується та сама формула:



Відмінність у вимогах до режимів роботи з потужністю 60 і 30 кВт міститься тільки в членах  і . Для потужності 60 кВт  визначається так:



та



Для подачі потужності 60 кВт члени  і  визначаються вимогою безвідмовної роботи хоча б двох перетворювачів частоти з трьох з їх генераторами та двигунами. Остаточна формула для *R*60 після прирівнювання членів RД1=RД2= ... і т. д. має вигляд:



Для подачі потужності 30 кВт члени  і  визначаються вимогою безвідмовної роботи хоча б одного з трьох перетворювачів частоти:



Остаточна надійність системи при подачі потужності 30 кВт у цьому випадку дорівнює:



Схема *б* – найбільш надійна, проте схема *в* також може бути прийнята залежно від заданих вимог надійності та безпеки. Надійність схеми *в* може бути збільшена, якщо передбачити перемикач, автоматичний або керований вручну, для того щоб будь-який перетворювач частоти міг працювати з будь-яким з чотирьох індукційних генераторів. Коли перетворювачі частоти розміщені у фюзеляжі, такий перемикач практично можна здійснити. Крім автоматичного перемикача, може бути передбачено перемикання вручну, і в цьому випадку надійність перемикання стає рівною одиниці для всіх практичних випадків, оскільки ця операція виконується тільки один раз. У тримоторних літаках можна мати лише три генератори, а наявність перемикача для перетворювачів частоти забезпечить достатню безпеку під час роботи аварійного блоку живлення.

**Приклад 3** Досліджується надійність забезпечення необхідного гідравлічного тиску в точці з'єднання гальмівних систем двомоторного літака. Використовуються поршневі двигуни, кожен з яких надає руху відповідний гідравлічний насос, а обидва насоси разом створюють необхідний тиск в бортовій гідравлічній системі. Кожен насос забезпечує подачу заданого об'єму рідини та створює заданий тиск, тобто вони включені паралельно. Всі з'єднання та арматура бортової гідравлічної системи потенційно є місцями витоку і тому показані на блок-схемі мал. 25 як елементів, включених послідовно.

|  |
| --- |
| Мал. 25. Блок-схема забезпечення гідравлічного тиску. |

Надійність забезпечення заданого об'єму рідини та тиску в точці з'єднання гальмівних систем, з якої зусилля передається в ліву або праву гальмівну систему, дорівнює:



для 10-годинного польоту. Це означає, що в середньому при чотирьох або п'яти посадках за 1000 таких польотів не буде забезпечений нормальний тиск для гальмування.

Якщо в літаку є допоміжна гідравлічна система, що діє від насоса з електроприводом, з'єднання гідравлічної системи з гальмівною системою може збільшити надійність гальмування в нормальних умовах на два порядки. Для запобігання взаємодії основної та допоміжної систем можуть бути використані контрольні клапани.

Включення до блок-схеми передбачуваної допоміжної системи показано на мал. 26. В результаті ймовірність збільшиться з *R*A=0.9957 до:



і після включення допоміжної системи нормальний тиск не буде забезпечено в середньому приблизно при трьох посадках на кожні 100000 польотів. Таким чином, завдяки введенню навантаженого резерву надійність збільшується приблизно на два порядки.

|  |
| --- |
| Мал. 26. Блок-схема забезпечення гідравлічного тиску із допоміжною системою.  *RA – надійність основної гідравлічної системи; RB – надійність допоміжної*  *гідравлічної системи; R – ймовірність необхідного гідравлічного тиску у місці з'єднання* |

# Лекція 19. ПРОФІЛАКТИЧНІ ОГЛЯДИ І ЗАМІНА ДЕТАЛІВ

У лекції 16 були введені коефіцієнти використання та готовності системи та обговорювалися способи обслуговування систем. Час ремонту, необхідне кожного елемента, змінюється залежно з його фізичних показників і розміщення у системі, але може також змінюватися для однакових елементів у тому ж розміщенні. Існує певний мінімальний час, потрібний для доступу до несправного елемента, щоб вилучити його та поставити назад або замінити іншим. Цей час, як і час ремонту, змінюється залежно від досвідченості персоналу, але можна припустити, що для заданого елемента при певному його розміщенні загальний час ремонту розподіляється приблизно за нормальним законом, з деяким середнім значенням та певним стандартним відхиленням. Якщо це середнє і відповідне стандартне відхилення експериментально оцінені для заданої бригади і досить великої кількості оглядів конкретного елемента в даній системі, можна побудувати криву нормального розподілу часу ремонту і на підставі цієї кривої визначити ймовірність того, що ремонт буде здійснено в заданий час.

Як видно з кривої нормального розподілу, ймовірність того, що ремонт буде виконаний в інтервалі часу, що дорівнює середньому часу *М*, становить 0.5, а ймовірність того, що ремонт буде здійснено за час, що дорівнює *М*-3σ, становить лише 0.0014. Імовірність ремонту певного елемента у цій системі протягом заданого часу іноді називають *ремонтопридатністю* цього елемента.

При обчисленні коефіцієнта готовності системи слід враховувати тривалість простоїв, зумовлених як плановим, і позаплановим оглядом. При обчисленні коефіцієнта готовності без урахування профілактичного обслуговування враховується лише тривалість простою через позапланові огляди.

Тривалість простою між двома регулярними або плановими оглядами залежить від надійності системи та визначається середнім числом відмов системи та часом, що витрачається на усунення цих відмов.

Коли середнє напрацювання на відмову системи дорівнює *m*, можна визначити, наскільки часто відмовлятиме система за час *Т*0 між двома регулярними оглядами, де *Т*0 – напрацювання системи, що дорівнює поточному рамі за вирахуванням загальної тривалості простою *Т*прост.

Якщо між двома регулярними оглядами на систему не впливають зносові відмови та її працездатність змінюється за експонентним законом, то її надійність протягом *Т*0 годин між двома оглядами дорівнює:

 (19.1)

де *Т*0 – потрібний час роботи.

Наприклад, якщо інтервал між оглядами апаратури або системи обраний рівним *Т*0=800 годин і середнє напрацювання на відмову цієї апаратури дорівнює *m*=4000 годин, то ймовірність того, що апаратура буде безвідмовно працювати протягом 800 годин, дорівнює:



Отже, очікується, що близько 82% комплектів працюватиме безвідмовно до наступного планового огляду, а близько 18% відмовить до моменту *Т*0. Таким чином, близько 18% комплектів повинні піддатися огляду до того, як закінчаться заплановані 800 годин. Інакше кажучи, очікуваний середній час між оглядами буде меншим за 800 годин.

Середній час між оглядами *Т*ср обчислюється для напрацювання *Т*0 аналогічно тому, як обчислюється середнє напрацювання на відмову інтегруванням *R*(*t*) від нуля до нескінченності. Час *Т*ср фактично є середнім часом між оглядами як плановими, і позаплановими:

 (19.2)

У разі експоненційного закону воно одно:

 (19.3)

Таким чином, взагалі кажучи, *Т*ср дорівнює твору середнього напрацювання на відмову та ненадійності для періоду між плановими оглядами.

У даному випадку при *Q*(*Т*0) =0.18 і *m*=4000



Отже, якщо є 100 комплектів апаратури із запланованим часом між регулярними оглядами *Т*0=800 годин, приблизно 82 комплекти будуть працювати безвідмовно протягом 800 годин, а близько 18 з них відмовлять і повинні бути відремонтовані до закінчення 800 годин.

Якщо час між оглядами збільшити з 800 до 1000 годин і припустити, що при цьому не посилиться вплив зносу, результат буде наступний:



Це означає, що лише 78% від загальної кількості комплектів працюватиме безвідмовно протягом усього часу до планового огляду, а близько 22% відмовлять раніше. Якщо методика обслуговування полягає в тому, щоб виконувати огляд всієї апаратури щоразу після її відмови поряд з приватним її ремонтом за будь-якої відмови (як це зазвичай роблять з основним обладнанням, наприклад з літаковими двигунами тощо), то середній час між оглядами має бути порядку:



при запланованих 1000 годинах. Таким чином, відсоток відмов апаратури у період між регулярними оглядами збільшився з 18 до 22, але загальна кількість оглядів протягом тривалого часу зменшилася. Слід врахувати, що це збільшення періоду між оглядами не впливає на надійність апаратури доти, доки є впевненість у відсутності зносових відмов.

З іншого боку, основним призначенням огляду є запобігання зносу. У лекціях 6 і 7 показано, якою повинна бути допустима тривалість роботи елементів та апаратури для того, щоб мінімізувати вплив зносу. Для запобігання зносу у зв'язку з помітним збільшенням інтенсивності відмов час заміни або огляду окремих елементів має дорівнювати *М*-3σ, або *М*-4σ, або лежати в інтервалі (*М*-Зσ, *М*-4σ). Якщо система складається з більшої кількості елементів, час заміни чи огляду має бути значно зменшено, до *М*-5σ і навіть до *М*-6σ, залежно від вимог до надійності, тобто. залежно від того, яке збільшення інтенсивності зносових відмов у системі припустимо порівняно з інтенсивністю раптових відмов без зменшення надійності системи нижче за необхідний рівень.

Припустимо, що для взятої нами як приклад апаратури, що має середнє напрацювання на відмову *m*=4000 годин, середня довговічність з урахуванням зносу становить 1200 годин зі стандартним відхиленням σ= 100 годин. При виборі періоду між оглядами *Т*0 = 800 годин ймовірність зносової відмови до того, як закінчиться 800 годин, або після закінчення цього часу, відповідає *М*-4σ і дорівнює 0.0000317, тобто нескінченно мала в порівнянні з ймовірністю раптових відмов, що дорівнює 0.18 . Коли період між оглядами збільшують до 1000 годин, ймовірність зношування зростає до 0.0228, що відповідає *М*-2σ. Отже, загальна ймовірність відмов за 1000 годин збільшиться з 0.2 приблизно до 0.2428 і надійність системи для 1000 годин відповідно зменшиться з 0.78 приблизно до 0.757, що означає значне зменшення надійності. Якщо період між оглядами збільшити ще більше, скажімо до 1100, ненадійність збільшиться приблизно до 0.38.

Збільшення часу між оглядами пов'язане, таким чином, із середньою довговічністю апаратури та зі стандартним відхиленням. Щоб збільшення періоду між оглядами не впливало на надійність апаратури, необхідно збільшити також середню довговічність апаратури. Інакше надійність апаратури може різко зменшитися, особливо у години роботи безпосередньо перед оглядом.

Іноді задають умову, щоб кількість комплектів апаратури, що відмовили протягом періоду до планового огляду, що дорівнює *Т*0 годин, не перевищувала *х*%. При проектуванні такої апаратури слід враховувати інтенсивність як поганих відмов, так і зносових. Необхідна надійність апаратури протягом *Т*0 годин тоді буде *R*(*Т*0)=100-*х*% і дорівнює добутку *R*в(*Т*0)*R*і(*Т*0), тобто добутку ймовірностей того, що не станеться ні раптових, ні зносових відмов. Ці ймовірності можна по-різному варіювати, залишаючи незмінним величину твору. Отже, коли не уточнено співвідношення раптових та зносових відмов, для *m*, *М* та σ можуть бути обрані різні розрахункові рівні. Але надійність системи для коротких проміжків часу безпосередньо до та після огляду визначається саме цим співвідношенням.

Якщо припустити, що на апаратуру впливають тільки зносові, але не раптові відмови (що часто має місце), то в цьому випадку *Т*0=*М*-*n*σ визначається вимогою, щоб між двома регулярними оглядами або двома плановими замінами було не більше *х*% відмов. Величина n може бути взята з таблиць нормального розподілу, якщо попередній досвід дозволяє визначити значення σ для аналогічної апаратури (наприклад, σ=*М*/10). Тоді розрахунковий рівень середньої довговічності апаратури обчислюється так:

 (19.4)

де *n* безпосередньо беруть з таблиць нормального розподілу, σ визначається експериментально, а *Т*0 задається вимогою про те, щоб число відмов за час *Т*0 було не більше *х*%. Якщо, наприклад, поставлено, що їх має перевищувати 1%, то, по таблицям нормального розподілу знаходимо *n*=2.34. Тоді при *Т*0=1000 годин і при значенні σ=*М*/10, визначеному експериментально, розрахункова середня довговічність має бути, принаймні, дорівнює або більше:



Аналогічні міркування застосовні також заміни деталей. Якщо заміна деталей здійснюється регулярно з метою звести до мінімуму зносові відмови, цей випадок ідентичний випадку регулярних оглядів. Знову слід розглянути співвідношення між раптовими та зносовими відмовами, якщо відомо, що відбуваються відмови обох типів. Якщо припустити, що інтенсивність раптових відмов дорівнює нулю, можна враховувати лише зносові відмови. Якщо час регулярної заміни *Т*0 таке, що знос практично виключений, то цьому випадку можна враховувати лише раптові відмови.

Однак на практиці, особливо при експлуатації електронної апаратури, часто допускається робота елементів доти, доки вони не відмовлять і не викличуть цим порушення роботи системи. Як було показано в лекції 7, передбачається, що в такій системі після деякого періоду стабілізації середня частота відмов стане порівняно високою і відповідатиме середній частоті заміни елементів, так що в цьому випадку знос грає головну роль. Це стане очевидним, якщо розглядати елемент із середнім напрацюванням па (раптовий) відмова порядку *m* = 1000000 годин і з середньою довговічністю лише близько 10000 годин. Через рік безперервної експлуатації ймовірність зносових відмов такого елемента буде високою. Імовірність раптової відмови протягом цього року, однак, дуже мала – вона приблизно дорівнює:



Імовірність того, що за ці 8760 годин не станеться раптової відмови, буде таким чином дорівнює 0.99124, а для 10000 годин вона буде близько 0.99. Імовірність того, що за 10000 годин не відбудеться зносової відмови, дорівнюватиме лише 0.5. Таким чином, ясно, що при тривалій роботі буде швидше за все лише одна раптова відмова на кожні 50 зносових відмов, тобто їхнє відношення буде 2:100.

З іншого боку, якщо прийнято планову регулярну заміну деталей, кількість зносових відмов може бути значно зменшено, а у всіх практичних випадках вони можуть бути зовсім виключені в результаті правильного вибору періоду заміни *Т*0=*М*-*n*σ. Тоді можуть бути тільки раптові відмови, і ймовірність того, що апаратура відмовить під час роботи, різко зменшується. Якщо в період між регулярними замінами елементів можуть відбутися тільки раптові відмови, число однотипних елементів, що підлягають заміні через відмови в період до регулярної заміни *Т*0, в середньому дорівнює:

 (19.5)

де *N* – число однотипних елементів у апаратурі, а  – ненадійність одного елемента напрацювання між двома регулярними замінами. Коли  мала і відбуваються лише раптові відмови, може бути використане наближення  і тоді отримуємо:

 (19.6)

За цією спрощеною формулою легше вести розрахунок кожного типу деталей в апаратурі чи системі.

Розглянемо вплив обраного способу обслуговування надійність резервованих систем. У лекціях 11-13 були наведені формули для розрахунку надійності систем з навантаженим та ненавантаженим резервом та для більш складних систем. Були також обчислені середні напрацювання на відмову цих систем шляхом інтегрування функції надійності *R*(*t*) в межах від 0 до ∞. У середньому такі резервовані системи відмовлять по одному разу за кожні *m* годин, якщо елементи не були замінені ще до моменту відмови системи. Однак якщо прийнятий такий спосіб обслуговування, при якому можлива заміна або відновлення резервованих елементів, що відмовили, до моменту відмови системи, то можна збільшити період її роботи до відмови, причому це збільшення залежить від того, наскільки часто оглядається і ремонтується система, або усунути несправності, виявлені в результат огляду. При такому способі обслуговування система рідше відмовлятиме, ніж за відсутності оглядів, оскільки при цьому з'являється впевненість, що кожен новий експлуатаційний період після огляду починається при повному відновленні резерву. Таким чином, середнє напрацювання на відмову системи стає більше *m*, а теоретично вона стала б нескінченно великою, якби резервовані елементи, що відмовили, негайно замінювалися.

Щоб з'ясувати, як пов'язаний час *Т* між двома оглядами із середнім напрацюванням на відмову *m*т у системі, якщо вона оглядалася кожні *Т* годин, повернемося знову до виразів (19.2) та (19.3). Час *Т*ср у цих рівностях є середнім часом між плановими і позаплановими замінами. Таким чином, воно є часом, за який система відновлюється до свого вихідного стану. Однак із цих операцій з відновлення системи тільки *Q*(*t*) викликані відмовою системи, тоді як [1-*Q*(*t*)] або *R*(*t*) виробляються для попередження зносу в період, коли відмов системи не відбувається. Таким чином, можна визначити середнє напрацювання на відмову відновлюваного пристрою або системи в залежності від часу *Т* між відновленнями:

 (19.7)

де *m*т - відношення середнього часу *Т*ср між плановими та позаплановими відновленнями до тієї частини відновлень, яка викликана фактичною відмовою системи. Це відповідає визначенню ймовірності відмови *Q*(*t*), яка є відношенням середнього часу між усіма відновленнями (плановими і позаплановими) до середнього напрацювання на відмову (тобто часу між відновленнями, обумовленими фактичною відмовою):

 (19.8)

Для системи послідовно з'єднаних елементів з експоненціальним законом відмов відношення у формулі (19.7) завжди залишається постійним незалежно від *Т* та одно



до тих пір, поки надійність елементів системи змінюється по експоненті, інакше кажучи, поки не позначається вплив зносу, або здійснюється заміна елементів до того, як на них починає позначатися знос. Однак у системі, надійність якої змінюється не експоненційно, наприклад, у резервованій системі, або ж у випадку, коли елементи піддаються зносу, середнє напрацювання на відмову *m*т; стає функцією планового часу відновлення *Т*.

Якщо час відновлення *Т* постійно, то навіть система з не експоненційним законом відмов буде мати ту ж саму ймовірність відмов у кожному інтервалі *Т* між двома плановими відновленнями, оглядами або перевірками, внаслідок чого на початку кожного періоду *Т* система перебуватиме у справному стані та, наближено, надійність протягом тривалого періоду часу експоненційно зменшуватиметься із середнім напрацюванням на відмову *m*т, заданою виразом (19.7), та середньою постійною інтенсивністю відмов, заданою виразом:

 (19.9)

Для резервованих систем, що регулярно оглядаються, плановий час відновлення *Т* дорівнює часу між двома регулярними оглядами. Якщо в результаті огляду виявляються резервні елементи, що відмовили, їх замінюють так, щоб повністю відновити резервування в системі. Якщо у процесі огляду відмов не виявляється, вважається, що система відновилася сама собою, оскільки надійність її елементів змінюється за експоненційним законом і система працює з повним резервуванням. Середнє напрацювання на відмову *m*т і середня інтенсивність відмов λср визначаються тоді з (19.7) і (19.9) підстановкою замість *Т* часу між плач новими регулярними оглядами.

На мал. 27 показано зміну середнього напрацювання на відмову *m*т регулярно оглядається резервованої системи в залежності від часу огляду *Т*. Чим частіше проводиться огляд системи, тобто чим менше період *Т*, тим більше буде середнє напрацювання на відмову *m*т системи. І навпаки, що більше *Т*, то менше середнє напрацювання на відмову, а межі, коли система взагалі регулярно не оглядається, тобто коли *Т*=∞, середнє напрацювання на відмову стає рівною:



як випливає з (19.7).

|  |
| --- |
| Мал. 27. Середнє напрацювання на відмову резервованої системи під час проведення планових оглядів та ремонтів |

На мал. 28 показані крива миттєвих значень інтенсивності відмов:



як функція напрацювання *t* і крива λср(*Т*) як функція часу між оглядами *Т*.

|  |
| --- |
| Мал. 28. Інтенсивність відмов резервованої системи з профілактичним обслуговуванням та без нього  λ(*t*) – миттєве значення інтенсивності відмов; λ(*T*) – середнє значення інтенсивності відмов при обслуговуванні через кожні *T* години |

Якщо система не оглядається, то λ(*t*) наближається у межі значення інтенсивності відмов λ1 найбільш надійного елемента системи, здатного самостійно виконувати функції всієї системи. Але якщо система оглядається регулярно через кожні *Т*1, годин, миттєве значення інтенсивності відмов λ(*t*) для неї знову падає до нуля через кожні *Т*1 годину в міру відновлення системи, що показано нижньою пилкоподібною лінією, і система матиме постійну середню інтенсивність відмов λср(*T*1), яка може бути обчислена за формулою (19.9) при заміні у ній *Т* на *Т*1. Якби система оглядалася тільки через кожні *Т*2 години, вона відповідно до графіка мала постійну середню інтенсивність відмов λср(*T*2). Пунктирною лінією показано зміну середньої інтенсивності відмов системи як функції часу огляду *Т*.

Важливо усвідомити, що безпосередньо кількісною характеристикою регулярно обслуговуваної резервованої системи є її середня інтенсивність відмов. Отже, λср може бути додана до інтенсивностей відмов будь-яких інших елементів, що працюють послідовно. із резервованою групою. Це підсумовування показано на мал. 29 де резервована група, що оглядається через кожні *Т* години, працює послідовно з рядом елементів, загальна інтенсивність відмов яких дорівнює λ0. В цьому випадку інтенсивність відмов системи дорівнює:



а надійність системи:



|  |
| --- |
| Мал. 29. Середнє значення інтенсивності відмов у системі зі змішаним з'єднанням (планові огляди та ремонти проводяться в момент *Т*)  Надійність системи |

З мал. 28 і 29 видно, що інтенсивність відмов λср, яку, за припущенням, має резервована система, що знаходиться в експлуатації, залежить від вибору часу огляду *Т*, яке визначає також надійність системи в реальних умовах експлуатації.

Можна поставити питання, яке миттєве значення інтенсивності відмов у деякий довільний час *t* якщо в момент часу *t* = 0 система вводиться в експлуатацію з повним закладеним у неї резервуванням і в жоден період між цими моментами часу система не обслуговується. Ця функція показана у вигляді кривої λ(*t*). Однак якщо оглянути систему в момент *t* то виявиться, що інтенсивність відмов резервованої системи або дорівнює нулю, якщо обидва елементи в системі ще працюють, або дорівнює постійному значенню λ1 коли хоча б один з резервованих елементів ще діє. Система просто не може мати будь-яке інше значення інтенсивності відмов, крім нуля або λ1. Сенс параметра λ(*t*) у тому, що з великому числі спостережень усереднюються результати трьох можливих станів системи, як у момент часу *t* система теоретично мала б миттєве значення інтенсивності відмов λ(*t*). Отже, λ(*t*) дозволяє визначити можливість безвідмовної роботи у період від *t*=0 до *t*, тобто надійність системи, якщо вона протягом цього періоду не обслуговується, дорівнює:

 (19.10)

Якщо система не відмовила до моменту часу *t*1 і в цей момент не буде проведено огляд системи, тобто залишиться невідомим, відмовили чи ні резервовані елементи, інакше кажучи, якщо невідомий стан системи, тобто не можна сказати, чи має система інтенсивність відмов, що дорівнює нулю або λ1, то надійність її роботи в проміжку від *t*1 до наступного моменту *t*2 визначається виразом:

 (19.11)

Але це не буде справжньою надійністю системи, що працює в проміжку від *t*1 до *t*2. Фактично надійність системи може бути визначена тільки в результаті її огляду в момент *t*1 для з'ясування ступеня резервування, якщо воно ще збереглося, та шляхом подальшого обчислення надійності системи. Проте внаслідок тривалих спостережень ми знайдемо, що надійність системи у середньому дорівнює значенню, отриманому з виразу (19.11). Його можна переписати у логарифмічній формі:



або приблизно, при *R*(*t*) >0.9, у вигляді:

 (19.12)

Апроксимація іноді також використовується для обчислення середньої інтенсивності відмов резервованих систем, які регулярно оглядаються через кожні *Т* годин, точне значення якої дається формулою (19.9). Ця апроксимація має вигляд:

 (19.13)

Цей вираз може бути використаний до тих пір, поки *Т* залишається значно меншим від середнього напрацювання на відмову системи, що працює без профілактичного обслуговування.

Нижче наводяться формули для деяких найпоширеніших резервованих систем:

1. Два однакові елементи, ненавантажений резерв, інтенсивність відмов кожного елемента дорівнює λ:



2. Два однакові елементи, навантажений резерв, інтенсивність відмов кожного елемента дорівнює λ:



3. Три однакові елементи, навантажений резерв, інтенсивність відмов кожного елемента дорівнює λ. Для виконання завдання принаймні два елементи мають працювати:



Аналогічні формули можуть бути виведені будь-якої іншої резервованої системи. З наведених прикладів видно, що у час *t*=0 інтенсивність відмов резервованої системи завжди дорівнює нулю. Ця умова залишається чинною доти, доки будуть працездатні принаймні два з резервованих елементів, кожен з яких самостійно здатний виконувати поставлене перед системою завдання. Ясно також, що середній наробіток на відмову при профілактичному обслуговуванні *m*т досягає значення середнього напрацювання на відмову *m*, наявного у випадку, коли резервовані елементи, що відмовили, не замінюються.

Формули, використані у трьох наведених прикладах, засновані на припущенні про експонентний закон відмов елементів, що мають постійні інтенсивності відмов. Щоб система продовжувала працювати в таких умовах, необхідно поряд з перевіркою та обслуговуванням системи через кожні *T* години час від часу замінювати елементи, що не відмовили, скажімо, через кожні *Т*и годин. Фактично *Т*и є величиною, кратною часу огляду *Т*.

Однак основні формули (19.7) та (19.9) для *m*т і λср справедливі незалежно від характеру розподілу відмов елементів. Наприклад, якщо відомо, що елемент відмовляє тільки через знос і не замінюється при профілактиці, то його середнє напрацювання на відмову дорівнюватиме середньої довговічності *М*. Зміна інтенсивності його відмов показано у вигляді кривої на мал. 1 у матеріалах СРС до лекції 6. Однак, коли елемент замінюється при профілактичному обслуговуванні через кожні *Т*и годин, його середнє напрацювання на відмову стає рівною:

 (19.14)

де *R*и(*Т*) задано формулою (7.1 б), *Т* – час експлуатації елемента, а *Т*и – час регулярної заміни. Середня інтенсивність відмови елемента тоді дорівнюватиме:



цю інтенсивність відмов можна послідовно комбінувати з інтенсивністю відмов інших елементів. Крім того, можна замінити *R*и(*Т*) функцією довговічності елемента *L*(*Т*), а *Q*и(*Т*и) замінити на 1-*L*(*T*и). Тоді з (19.14) отримаємо найбільш загальний вираз для середнього напрацювання на відмову  елемента, що регулярно замінюється через кожні *Т*и годин.

# Лекція 20. ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ

За визначенням надійність є ймовірність того, що пристрій виконуватиме свої функції в заданих умовах протягом певного періоду часу. Період часу, протягом якого пристрій працює задовільно, становить особливий інтерес при розрахунку надійності.

Для розрахунку надійності насамперед необхідно зібрати статистичні дані про безвідмовну роботу пристроїв у часі; це здійснюється шляхом спостереження за працюючими пристроями, вимірювання часу їхньої безвідмовної роботи та підрахунку кількості відмов, якщо вони відбуваються в період спостереження. Коли накопичені достатні дані щодо інтервалів часу повністю, можна досить точно оцінити величину середнього напрацювання на відмову *m*.

Термін «середнє напрацювання на відмову» використовується у разі застосування простих елементів, які не відновлюються при відмові, а замінюються справними. Якщо велика партія з *n* однакових елементів введена в експлуатацію в момент часу *t*0, кожен з цих елементів матиме своє напрацювання *t*i до відмови. Ці часи можуть бути точно виміряні, і тоді середнє напрацювання на відмову виходить як сума часів *t*i всіх *n* елементів, поділена на число всіх елементів.

Прийнято використовувати термін «середнє напрацювання на відмову» як для елементів, що не відновлюються, так і для відновлюваних пристроїв і систем. В обох випадках він означає той самий статистичний середній час виникнення відмов, і цю величину необхідно знати. для обчислення ймовірності, що використовується при оцінці надійності елементів та систем.

У попередніх лекціях було показано, що можливі відмови двох типів: раптові та зносові. Існують і відмови третього типу – приробіткові, проте, якщо їх вдається одного разу усунути і якщо застосовується правильна методика відбраковування, цих відмов зазвичай не буває. Отже, надійність апаратури, що вже пропрацювала деякий час, визначається ймовірністю появи раптових і зносових відмов. Раніше було також показано, що раптові та зносові відмови мають різні розподіли. У той час як раптові відмови мають експоненційний розподіл з постійною інтенсивністю відмов, зносові відмови мають нормальний або логарифмічно-нормальний розподіл зі швидким наростанням інтенсивності відмов протягом періоду зносу та постійною частотою заміни після настання так званого «періоду стабілізації». .

Оскільки розподіл відмов у часі збігається з розподілом інтервалів часу до відмови *t*i, інтервали до раптової відмови мають експоненційний розподіл, а до зношування – нормальний або логарифмічно-нормальний розподіл. Так як причини виникнення цих відмов різні, середні значення зазначених інтервалів будуть різними для однієї і тієї ж генеральної сукупності елементів. Наприклад, середнє напрацювання на раптову відмову *m* генеральної сукупності елементів може становити мільйон годин, а середнє напрацювання *М* на зносову відмову – лише 10000 годин. Середнє напрацювання *М* на зносову відмову називаємо середньою довговічністю. Термін «довговічність» використовується для зносових відмов, оскільки саме знос визначає межі експлуатаційної довговічності елементів. У невідновлюваній апаратурі, призначеної для короткочасної експлуатації, протягом якої можна знехтувати ймовірністю зношування, раптові відмови елементів є основним фактором, що впливає на надійність апаратури. Аналогічно раптові відмови визначають і надійність апаратури, в якій знос елементів не допускають, застосовуючи їх профілактичну заміну через регулярні інтервали часу.

При розрахунках надійності велике значення мають як раптові, і зносові відмови. Частота появи тих та інших спільно визначає надійність апаратури на різних етапах експлуатації елементів, проте для обчислення надійності та складання оптимальних планів заміни деталей при профілактичному обслуговуванні повинні бути окремо відомі розподіли. раптових та зносових відмов. Іншими словами, слід якомога точніше знати справжнє значення марного напрацювання на раптову відмову *m*, так само як справжнє значення середньої довговічності *М* і стандартного відхилення σ зносових відмов. Параметри *М* і σ дають можливість скласти відповідні плани замін або оглядів, а параметр *m* може бути використаний для обчислення ймовірності відсутності раптових відмов у період між замінами або оглядами. Якщо замінюються тільки елементи, що відмовили (тобто якщо обирається методика ремонту після відмови, а не профілактичного обслуговування), то надійність довговічної апаратури визначається спільно параметрами *М* і *m*. Оскільки час *М* зазвичай значно коротший *m*, надійність такої апаратури набуває значення, що визначається майже виключно наявністю певного типу зносових відмов елемента.

Очевидно, що всі три параметри – *m*, *М* і σ – генеральної сукупності елементів змінюються в залежності від рівня навантаження, при якому елементи працюють. Ці параметри вимірюються в одиницях часу, зазвичай, у годинах. Однак одиниці часу можуть бути також перетворені в інші одиниці, що характеризують напрацювання і довговічність елементів, наприклад число робочих циклів (для перемикаючих пристроїв) або число обертів (для обертових пристроїв і кулькових підшипників) і т. д. Відповідними параметрами є в таких випадках середнє число циклів чи оборотів у період між раптовими відмовами чи середня довговічність, виражена числом робочих циклів чи числом оборотів.

Точні закони, відповідно до яких надійність параметрів змінюється при зміні рівнів навантаження, поки що невідомі. У лекції 15 був наведений ряд емпіричних формул, які при обережному використанні можуть дати добрі результати. Однак, якщо потрібна висока точність оцінки параметрів надійності, необхідно перевіряти елементи при тих же рівнях навантаження, за яких вони будуть працювати в практичних умовах. Таку методику називають *лабораторною оцінкою параметрів надійності за умов імітованих навантажень*. Намагаються імітувати, наскільки це можливо, весь діапазон навантажень як внутрішніх навантажень, так навантажень, викликаних впливом довкілля. Інший спосіб полягає у *спостереженні за елементами в умовах експлуатації в апаратурі*, в якій вони встановлені. Якщо точно визначити напрацювання для тривалих експлуатаційних періодів і ретельно фіксувати всі відмови, можна отримати інформацію про надійність елементів в апаратурі про надійність самої апаратури. Однак це – підхід «постфактум». Його цінність полягає лише у збиранні статистичних даних або у виправленні умов, що призводять до ненадійності, яких можна було б уникнути на етапі проектування або шляхом попереднього випробування елементів та зразків. Таке пізнє виправлення вимагає зміни конструкції та викликає додаткові витрати часу та коштів. Водночас статистичні дані дуже цінні, коли відсутня будь-яка інша інформація щодо надійності елементів. При розумному та обережному використанні ці дані допоможуть у підготовці попереднього та порівняльного аналізу даних про надійність для нових розробок.

Приступимо тепер до обговорення різних способів оцінки надійності. При цьому нам потрібно буде розрізняти ймовірності раптових та зносових відмов. Перша можливість показує, як поводяться надійні елементи протягом нормальної експлуатації, друга дає інформацію про тривалість періоду, протягом якого елементи можуть використовуватися, не викликаючи погіршення надійності всієї апаратури. Способи їх визначення та їх статистична обробка різні для раптових та зносових відмов.

Що стосується раптових відмов, то в цьому випадку інтерес представляє один параметр – середнє напрацювання на відмову. Якщо цей параметр відомий для заданого режиму навантаження, надійність виконання заданої функції при цьому рівні навантаження протягом часу *t* обчислюється за експоненційною формулою , де *m* – середнє напрацювання на відмову, що дорівнює величині, зворотної постійної інтенсивності відмов λ. Як зазначалося в лекції 1, справжнє значення ймовірності теоретично ніколи точно не відомо, але досить близькі значення можна отримати в результаті великої кількості експериментів. Це міркування застосовно також до середнього доробку на відмову. Позначення  буде використано для «оцінки» справжнього середнього напрацювання на відмову.

Ступінь точності оцінки залежить кількості наявних даних, виходячи з яких ця оцінка обчислюється. Нижче буде показано, що можна встановити так звані «довірчі межі», верхню та нижню, проте перш за все розглянемо, як можна отримати оцінки середнього напрацювання на відмову.

Вище було сказано, що оцінка середнього напрацювання на відмову виходить в результаті визначення часів до відмови *ti* на ряді зразків, підсумовування цих часів та поділу отриманого результату на кількість відмов. Проте практично слід пам'ятати, що елементи можуть відмовляти як раптово, і через зносу. Припустимо, що є велика партія зразків, скажімо з: 100 елементів, з якої вилучені дефектні або нестандартні зразки, що викликають приробіткові відмови, тобто є припрацьована або відбракована партія і потрібно визначити середнє напрацювання на відмову *m* цієї партії. Головне завдання, з яким доводиться стикатися від початку при плануванні випробувань, полягає в тому, щоб визначити, який час необхідно витратити на випробування. Очевидно, що неможливо чекати доти, доки відмовлять усі 100 елементів, і отримати, таким чином, 100 вимірювань часів до відмови, на підставі яких обчислюється середньоарифметичне значення:

 (20.1)

де *n* = 100. Навіть якби для випробувань було відведено час у кілька років (тобто можна було б підрахувати середньоарифметичне після відмови всіх 100 елементів), питання про те, скільки з них відмовило б раптово, а скільки елементів відмовило б через знос, залишився б відкритим. Можна з упевненістю припустити, більшість елементів відмовить під впливом зносу. Тому середньоарифметичне значення, одержуване з формули (20.1), будучи середньоарифметичним з урахуванням як раптових, і зносових відмов, не забезпечує нас необхідною інформацією.

Таким чином, необхідно обмежити тривалість випробувань для того, щоб бути достатньо впевненим у відсутності зносових відмов протягом періоду випробувань. Це означає, що можна допустити відмову лише невеликої частини зі 100 елементів, скажімо лише 5, і після п'ятої відмови необхідно припинити випробування. Припустимо, що ці 5 відмов є раптовими, і підрахуємо середнє напрацювання на (раптову) відмову для заданої генеральної сукупності елементів. Найкраща оцінка, звана *оцінкою максимальної правдоподібності*, виходить шляхом підсумовування напрацювань для всіх 100 елементів з подальшим розподілом суми на число раптових відмов (п'ять), що мали місце у процесі випробувань. У чисельнику коштує сума зафіксованих напрацювань для всіх 100 елементів, що дорівнює:



де *t*1, *t*2, . . . – часи, у яких відбулася відмова п'яти елементів, т. е. часи, протягом яких п'ять елементів працювали досі відмови. Випробування були припинені в момент часу *t*5, коли 95 елементів ще працювали, отже, їх напрацювання дорівнюватиме  годин. Таким чином, величина *Т* представляє сумарне напрацювання 100 елементів за час випробування.

Очевидно, що, якщо підсумувати напрацювання до відмов тільки для п'яти елементів, що відмовили, вийде песимістичний результат з сильною недооцінкою справжнього середнього напрацювання на відмову, оскільки не враховувався той факт, що 95 елементів до моменту припинення випробування працювали успішно. Було б також неправильно ділити суму напрацювань *Т* на загальну кількість елементів, що випробовувалися, так як при цьому знову не враховується той факт, що відмовили тільки 5 зі 100 елементів.

Якщо ретельний огляд елементів, що відмовили, покаже, що один з них відмовив через знос, слід розглядати цей елемент як вилучений з випробувань до моменту його відмови і зовсім не враховувати цю відмову. Тоді кількість відмов, що спостерігалися, скорочується до чотирьох. Однак повне напрацювання *Т* залишається колишнім.

Описаний вище спосіб визначення середнього напрацювання елементів на відмову називається способом «*без заміни*». Відмовили елементи не замінюються у процесі випробування, т. е. число випробуваних елементів зменшується однією після кожного відмови. Якщо *n* елементів піддати випробуванням і *r* їх відмовлять в моменти часу *t*1, *t*2, . . . *tr* відраховуються від початку випробування, а випробування припиняться на момент часу *tr*, настання *r*-го відмови, так що (*n*-*r*) елементів ще не відмовлять до кінця випробування, то оптимальна оцінка середнього напрацювання на відмову визначається формулою:

 (20.2)

де чисельник представляє напрацювання *Т* всіх елементів, що випробовуються.

Якщо в процесі випробування буде вилучено *k* елементів у зв'язку зі зносовими відмовами або з інших причин, тобто буде враховано лише (*r*-*k*) раптових відмов, формула (20.2) зміниться таким чином:

 (20.3)

Сума Σ*t*i являє собою напрацювання для елементів, що відмовили, вилучені або забраковані, а r - сума відмовили і вилучених елементів; *t*r – момент часу, коли випробування було припинено при відмові або вилученні r-го елемента. Чисельник, так само як і раніше, є повною сумою напрацювань для всіх *n* елементів, що випробовувалися.

Щоб уникнути зносових відмов елементів при випробуваннях, час випробування *t*r повинен бути вибраний можливо більш коротким порівняно з довговічністю елементів. Зносові відмови не завжди легко пізнати, що ускладнює вимірювання інтенсивності раптових відмов. З іншого боку, оскільки точність оцінки  (тобто величина відхилення її від істинного значення *m*) залежить від кількості відмов, зафіксованих у процесі випробування, очевидно, що випробування необхідно проводити на можливо більших партіях елементів.

Вибір розмірів партії, тобто числа елементів, що підлягають випробуванню залежить від часу випробування *t*r, а також від необхідних точності та достовірності результатів випробування. Припустимо, що, відповідно до очікувань, інтенсивність раптових відмов для заданого типу опорів буде близько  т. е. *m*=105 годин, і бажано проводити випробування до появи 25 відмов, т. е. потрібно забезпечити досить високу достовірність оцінки *m*, одержуваної після випробувань. Яку кількість опорів слід випробувати, якщо повний час випробування *t*r, які мають, дорівнює 1000 годин? Припустимо, що опори не мають дефектів і пройшли відбраковування, так що протягом 1000 годин жоден опір не відмовиться через знос, і нехай в результаті 1000-годинного випробування потрібно отримати ймовірність відмов, рівну 25/*n*, де *n* – число обраних елементів, спочатку включених у випробування. В цьому випадку очікувана ненадійність дорівнює:



і, отже, при  и *t*r=1000 годин



Це означає, що для такого 1000-годинного випробування необхідно мати 2500 елементів.

Якщо час, який мають при випробуванні без заміни елементів, дорівнює *t* годин, очікувана інтенсивність відмов зразків дорівнює λ, а  має оцінюватися з точністю, яку можна отримати при *r* раптових відмових, то число зразків *n*, які слід піддати випробуванням, дорівнює:

 (20.4)

де *Q*(*t*) – очікувана ненадійність елементів під час *t*.

Якщо не фіксуються моменти кожної раптової відмови при випробуваннях без заміни деталей, причому відомо, що випробування припиняються в момент часу *tr*, коли відмовляє *r*-й з випробуваних елементів, середнє напрацювання на відмову може бути знайдено із співвідношення:



Звідки

 (20.5)

Відповідна оцінка інтенсивності відмов дорівнює:

 (20.6)

Відносини елементів *r*, що відмовили, до загального числа спочатку відібраних елементів *n* може бути виражено у відсотках. Тоді (20.6) може бути записана так:

 (20.7)

де *a* - відсоток елементів, що відмовили.

Для швидкої оцінки іноді використовується наступна апроксимація формули (20.7):

 (20.8)

Ця формула не зовсім точна, тому що вона заснована на припущенні, що *r*=*nа*/100 відмов відбувається в середньому за час *t*/2, тобто за половину часу випробування, проте нею можна користуватися для спрощених обчислень при малому відсотку *a* елементів, що відмовили. Такого типу випробування без заміни елементів, коли вимірюється лише загальний час випробувань, а відсоток елементів, що відмовили, підраховується тільки в кінці випробувань, називаються *випробуваннями на відсоток відмов*. Перевагою таких випробувань є те, що немає необхідності вимірювати часи появи окремих відмов і замінювати елементи, що відмовили. Деякі фірми – виробники деталей вказують дані про надійність елементів на основі саме такої методики. У цьому випадку вони гарантують, що кількість елементів, що відмовили, не перевищить певного відсотка, якщо елементи працюють протягом заданого часу *t* при заданих робочих умовах і умовах зовнішнього середовища. Це відповідає гарантії, що інтенсивність відмов не перевищить значення, яке можна підрахувати за допомогою виразів (20.7) або (20.8).

Третій спосіб оцінки надійності елементів заснований на заміні елементів, що відмовили при випробуваннях. Елементи, що відмовили в процесі випробування, негайно замінюються новими з тієї самої генеральної сукупності. Отже, якщо п елементів відібрані для випробування, загальна кількість елементів, що проходять випробування, весь час залишається рівним *n*. Якщо випробування припиняються після закінчення часу *t* після початку випробування при *r*-му відмові, повне напрацювання для *n* елементів дорівнює *Т*=*nt* та оцінка середнього напрацювання на відмову в цьому випадку дорівнює:

 (20.9)

де *n* – постійне число однорідних елементів, що проходять випробування.

Спосіб із заміною елементів рідко використовується при лабораторних випробуваннях, оскільки для нього потрібне постійне обслуговування для негайної заміни елементів, що відмовили і він, очевидно, пов'язаний з великими витратами. Випробування ж без заміни елементів, зокрема випробування на відсоток відмов, не вимагають постійного обслуговування та можуть проводитись цілодобово. Проведення цих випробувань припиняють після закінчення заданого часу випробування *t* після того, як відбудеться задане число відмов елементів.

Однак формула (20.9) для випробувань із заміною елементів використовується при оцінці надійності елементів в експлуатації після збору та обробки даних про характеристики елементів у працюючих системах. Припустимо, що 100 однакових елементів використовуються у великій електронній системі, яка з моменту її включення працювала протягом 5000 годин. За цей час сталося та було зареєстровано 5 відмов. Якщо елементи включені в системі послідовно, то повне напрацювання всіх 100 елементів дорівнює  Отже, оцінка середнього напрацювання на відмову для цих елементів дорівнює  що відповідає оцінці інтенсивності відмов, що дорівнює 10-5 год-1. Звичайно, достовірність цієї оцінки не буде занадто великою, оскільки було зареєстровано лише 5 відмов, проте вона все ж таки дає досить реальне уявлення про надійність елементів.

Припустимо, що є чотири пристрої, що використовуються в системі регулювання температури літака, і польотний час 100 таких літаків становить 300000 льотних годин з моменту їх введення в експлуатацію. Нехай за цей час зареєстровано лише одну відмову пристрою регулювання температури. Загальна напрацювання всім пристроїв буде, таким чином, дорівнює:  Середнє напрацювання на відмову для одного пристрою, отже, становить  Достовірність цього результату, звичайно, буде набагато нижчою, ніж у попередньому прикладі, оскільки мала місце тільки одна відмова. У наступній лекції буде показано, як треба обчислювати довірчі інтервали для оцінок залежно від кількості відмов, виходячи з яких складаються ці оцінки.

При випробуваннях із заміною елементів інформація накопичується дещо швидше, ніж при випробуваннях без заміни, оскільки при випробуваннях першого типу число елементів, що піддаються випробуванням, залишається постійним, тоді як у випробуваннях другого типу їхнє число зменшується. Отже, протягом заданого періоду часу при випробуванні із заміною елементів кількість відмов буде більшою. Іноді потрібно дізнатися, скільки часу можна заощадити при лабораторних вимірах, якщо використовувати дорожчий спосіб випробувань із заміною елементів. Якщо повернутись наприклад з 2520 опорами при очікуваній інтенсивності відмов 10-5 год-1 і вимогі про випробування аж до того моменту, коли кількість відмов стане рівним 25, то виявиться, що випробування без заміни елементів займуть приблизно 1000 годин. На випробування ж із заміною, що проводяться до моменту, коли кількість відмов стане рівним 25, знадобиться приблизно 990 годин, як це випливає з (20.9). Економія часу для великої партії буде настільки незначна, що її можна знехтувати. Оскільки при оцінці інтенсивності раптових відмов для забезпечення необхідної точності та збереження тривалості випробувань значно меншого часу зносу необхідні великі партії елементів, очевидно, слід віддати перевагу способу вимірювання надійності елементів без заміни, тобто випробуванням на відсоток відмов (за винятком тих випадків, коли застосування способу випробування із заміною елементів (диктується особливими міркуваннями).

Оцінки середньої довговічності елементів при зносі та її стандартного відхилення можуть проводитись різними способами. Інформація про ці параметри необхідна, оскільки зносові відмови знижують надійність при тривалій роботі. Крім того, їх розподіл має бути відомий і для складання планів профілактичної заміни чи обслуговування. З мал. 8 і 10 (лекція 7) видно, наскільки ймовірність зносових відмов пригнічує ймовірність раптових відмов з часом експлуатації елементів. У великих складних системах з десятками тисяч послідовно з'єднаних елементів ймовірність зносових відмов може стати домінуючим фактором з погляду ненадійності, навіть якщо інтенсивність раптових відмов всіх цих елементів близька до нуля і якщо системи призначені для одноразового використання протягом декількох годин за весь термін служби ( як це, наприклад, має місце у ракетах).

Визначення середньої довговічності елементів можна порівняти з обчисленням середньої тривалості життя людей, які помирають від старості. Для цього береться велика вибірка даних про смертність, відкидаються випадки передчасної смерті від нещасних випадків, епідемій тощо. Виключається також смертність у дитячому віці. Крива розподілу тривалості життя людини (незалежно від причини смерті та віку) дуже близька до кривої, наведеної на мал. 30. На цій кривій вплив віку на смертність стає помітним, починаючи приблизно з 35 років. Потім «зносові відмови», показані пунктиром, накладаються інші причини смертності, які поступово поступаються місцем «зносу», що грає основну роль. Таким чином, можна припустити, що смертність «через знос» розподіляється нормально щодо середнього віку в 70 років зі стандартним відхиленням близько 11 років. Цей приклад не є, звичайно, точною аналогією для приробіткових, раптових та зносових відмов елементів, тому що варіації у людей виражені значно різкіше, ніж в елементах одного типу.

|  |
| --- |
| Мал. 30. Розподіл тривалості життя |

При визначенні середньої довговічності та стандартного відхилення довговічності необхідно починати випробування з нових елементів або елементів, що пройшли приробіток протягом відомого періоду роботи, щоб усунути відмови. Зазвичай, це число годин не перевищує 200 і, таким чином, мало в порівнянні з довговічністю елементів. Крім того, якщо зазначений доробок елементів, заздалегідь відомо, що вони почнуть працювати вже з певною кількістю напрацьованих годин.

Партія таких нових або припрацьованих елементів піддається потім досвідченої експлуатації, при якій імітуються впливи зовнішнього середовища, і це випробування триває доти, доки не відмовлять або всі елементи, або, принаймні, значний відсоток загального їх числа. Якщо під час випробувань відбуваються раптові відмови елементів, дані про такі елементи повністю виключаються з результатів випробування та їх напрацювання не враховуються. Передбачається, що інтенсивність раптових відмов залишається постійною протягом періоду нормальної експлуатації, тому ймовірність раптових відмов протягом заданого часу не змінюється. Але ймовірність зносових відмов зростає зі збільшенням тривалості роботи, і тому необхідно вимірювати сумарне напрацювання до зносового відмови.

Оцінюючи інтенсивності зносових відмов достатні значно менші партії елементів, ніж за оцінці інтенсивності раптових відмов, проте час випробування у разі буде значно більше. Як приклад розглянемо партію з 10 елементів з відомою середньою напрацюванням на раптову відмову, що дорівнює *m*=200000 годин для певних робочих режимів, і припустимо також, що середня довговічність цих елементів дорівнює *М*=10000 годин за тих самих умов. Якого числа раптових відмов очікується від 10 елементів до того, як вони відмовлять під впливом зносу? Відповідь на це запитання говорить: протягом 100000 годин сумарного напрацювання очікується не більше одного раптового відмови, а, можливо, і жодного. Якщо протягом 100000 годин відбудуться дві або більше раптові відмови, неминуче має виникнути питання, чи справді час 200000 годин є середнім напрацюванням на раптову відмову для таких елементів. Звичайно, при проведенні випробувань на довговічність з 25 елементами можна очікувати, що сумарна напрацювання буде порядку , і, отже, можна очікувати на одну або дві раптові відмови.

Що стосується очікуваної тривалості випробувань на довговічність 10 елементів із середньою довговічністю 10000 годин, то вона залежить від стандартного відхилення довговічності. Припустимо, що σ=1000 годин. У цьому випадку цілком ймовірно, що випробування закінчаться приблизно за 13000 годин, протягом яких очікується зношування всіх 10 елементів. При випробуванні більшої партії, що складається, скажімо, із 25 елементів, час випробування буде дещо більшим. У випадку, коли тільки один або два зразки пропрацюють час, що перевищує середню довговічність на три стандартні відхилення, випробування повинні бути перервані.

Крім того, при σ=1000 годин очікується появи зносових відмов не раніше, ніж через 6000 або 7000 годин. Отже, дані для елементів, які раніше відмовили, можна сміливо виключити без будь-якого більш докладного дослідження.

При обчисленні середньої довговічності та стандартного відхилення використовуються довговічності тих елементів, для яких є достатня впевненість у тому, що вони відмовлять через зношування. Перевірка фізичного стану елементів, а також ретельний статистичний аналіз даних про довговічність, наприклад, обчислення коефіцієнтів ексцесу або асиметрії, полегшують виключення раптових відмов, якщо такі є. Оцінки величин *М* і σ мають такий вигляд:

 (20.10)

 (20.11)

де *t*iи - робоча довговічність до зносової відмови, виражена в годинах i-го елемента, *r*и - число елементів, що відмовилися через зношування із загального числа *n* елементів, спочатку поставлених на випробування. Як було зазначено вище, середнє напрацювання елементів на відмову *m* зазвичай значно більше, ніж їхня середня довговічність *М*, і дійсне число раптових відмов становить в середньому *nМ*/*m*.

Якщо випробування, що проводяться на нормальній генеральній сукупності, припиняються в момент часу *t0*, коли залишаються збереженими елементів з початкової кількості *n* елементів, і є *n*-*а* вимірювань моментів *ti* відмови, отримують наступну оцінку s стандартного відхилення σ і оцінку  середньої довговічності *М*:

 (20.12)

 (20.13)

Після обчислення

 (20.14)

та

 (20.15)

величина *z* визначається за таблицями шляхом екстраполяції за відомими значеннями *h* та *y*. Значення функції *g*(*z*) у виразі (20.12) буде одно:

 (20.16)

де  визначається за тими самими таблицям в результаті екстраполяції за відомим значенням *z*. Для зменшення дисперсії оцінок  і s необхідно продовжувати випробування доти, доки не відмовлять принаймні 70% всіх елементів.

Оцінки середньої довговічності *М* та її стандартного відхилення застосовуються тільки до рівня навантаження, що існував під час випробувань. Вплив рівнів навантаження, що змінюються, на параметри надійності розглянуто в лекції 15. Однак слід підкреслити, що точні закони, відповідно до яких параметри відмінки змінюються як функції рівнів навантаження, невідомі, і найкращі оцінки можуть бути отримані лише в результаті статистичних випробувань при різних рівнях навантаження. На основі великої кількості таких випробувань можуть бути виведені наближені формули, користуючись якими можна оцінити параметри *М* і σ заданої генеральної сукупності для різних рівнів навантаження. При зменшенні рівнів навантаження середня довговічність продовжується, а дисперсія збільшується; зі збільшенням рівнів навантаження середня довговічність зменшується, як і і дисперсія.

Істотним для деяких елементів є так звана довговічність при зберіганні. Зменшення міцності у елементів, чутливих до впливу факторів зовнішнього середовища, таких, як вологість, атмосферний тиск, опромінення, хімічний склад та забруднення атмосферного повітря, мікроби та температура повітря, спостерігається навіть у тих випадках, коли елементи не використовуються, а зберігаються. При тривалому зберіганні таких елементів без достатнього захисту їхня міцність у момент введення в експлуатацію може виявитися зниженою у зв'язку з погіршенням їх параметрів під впливом комплексу вищезгаданих факторів. Це може викликати негайну або дуже ранню відмову цих елементів, що працюють при заданому рівні навантаження. Після тривалого зберігання слід перед тим, як застосовувати ці елементи, перевірити їх основні параметри. Статистичні дані про партії збережених елементів дозволяють отримати оцінки середньої тривалості зберігання та стандартного відхилення. Найчастіше спостерігаються нормальні розподіли. Корисним буває експериментально визначити вид навантаження, що надає найбільш шкідливий вплив при зберіганні елементів, та забезпечити захист від нього. Найбільш перспективним у цьому відношенні є, мабуть, зберігання в атмосфері інертних газів при зниженій температурі.

Інший формою зносу є догляд параметрів, що виражається у відхиленні параметрів електронних елементів від допустимих значень і змінюється залежно від напрацювання та рівня навантаження. До цієї категорії відносяться зміни ємності електролітичних конденсаторів, величини опорів, струму витоку колектора в транзисторах і т. д. Ці поступові зміни самі по собі не викликають відмови елементів, проте якщо схема розрахована на задані допустимі межі, а параметри елементів виходять за ці межі, схема може почати працювати неправильно. Таким чином, відмова систем може статися, незважаючи на те, що самі елементи не відмовили.

Очевидно, якщо схема розрахована на великі зміни параметрів елементів, вона не відмовить або відмова її відбудеться значно пізніше. Таким чином, у разі відходу параметрів елементів або зменшення допусків не можна говорити про інтенсивність «відмов елементів». З іншого боку, характер зменшення допусків цих елементів як функції часу, а також як функції рівня навантаження відіграє надзвичайно важливу роль при проектуванні електронної схеми. Цю інформацію мають надавати виробники елементів.

Для отримання картини погіршення параметрів велику партію нових елементів вводять у дослідну експлуатацію за заданого рівня навантаження. Навколишня температура та електрична напруга при випробуваннях повинні бути особливо точно задані. На початку випробувань вимірюють основний параметр всіх елементів, наприклад струм витоку колектора транзисторів, і будують криві розподілу. Після кожних 100, 500 або 1000 годин випробування ці вимірювання повторюються для всіх елементів, доки не буде отримана ясна картина розподілу, що показує розбіжність параметрів з часом. Це розбіжність може бути одностороннім чи двостороннім залежно від характеру застосовуваних елементів.

На мал. 31 показана узагальнена одностороння картина зміни меж струму витоку колектора транзисторів. Верхня межа (100% транзисторів) струму витоку транзистора генеральної сукупності зростає з часом за лінійним законом. Початковий розподіл струму витоку для генеральної сукупності показано зліва на рис. 31 при *t*=0 (кордон заштрихованої області). У правій частині фігури показано той самий розподіл після того, як партія пропрацювала понад п'ять одиниць часу. Верхня межа струму витоку збільшилася більш ніж удвічі. Отже, якщо схема була розрахована таким чином, що допускалося тільки подвоєння початкової верхньої межі струму витоку транзистора (див. лінію проектного рівня схеми), перша відмова схеми, зумовлена ​​збільшенням струму витоку транзистора, може статися в момент часу, показаний на графіку («перший відмова через погіршення характеристик». За наявності у схемі лише одного транзистора цієї генеральної сукупності ймовірність відмови схеми в цей час буде зовсім невеликою і залежатиме від крайньої лівої ділянки кривої розподілу струму. Однак ця ймовірність зростає тим швидше, чим великі ділянки кривої розподілу перетинають лінію проектного допуску схеми, і для одного елемента вона стає рівною 0.5 до того моменту, коли половина площі, обмеженої кривої розподілу, перетинає лінію проектного допуску схеми. Таким чином, очевидно, що для забезпечення надійності, щоб уникнути відмов через погіршення параметрів, необхідно, щоб час до першої відмови через погіршення параметрів було значно більше за проектну довговічність апаратури, в якій передбачається використовувати цю схему, або ж необхідно передбачити планову заміну елементів.

|  |
| --- |
| Мал. 31. Погіршення показників транзистора  (узагальнена характеристика) |

З кривої видно також, що якщо проектний допуск схеми збільшити втричі в порівнянні з початковою верхньою межею струму витоку, то час до першої відмови через погіршення характеристик приблизно подвоїться. Досвідчені конструктори вибирають як проектний допуск схеми величину, в 5 разів більшу за верхню межу струму, особливо в системах, призначених для роботи протягом тривалого часу, тобто в системах багаторазового використання.

Великий вплив на верхню допустиму межу струму витоку робить також робоча температура. Емпіричне праїло, яке часто використовується, полягає в тому, що верхня межа струму витоку подвоюється при збільшенні температури на кожні 10°С вище за її номінальну величину.

Наведені міркування показують, наскільки необхідно для проектування надійних схем знати розподіл догляду параметрів елементів в залежності від часу або температури та часу. Криві зі шкалами реального часу, що дають інформацію про значення рівнів навантаження при випробуваннях, повинні передаватися конструкторам з випробувальних лабораторій підприємств, що виготовляють елементи, бо споживачі схем не мають змоги знімати криві розподілу погіршення характеристик тисяч різних елементів. Такі криві забезпечують можливість складання оптимальних планів заміни елементів визначення програми профілактичного обслуговування.

Слід зазначити аналогію між звичайними зносовими відмовами, спричиненими зменшенням міцності, та відмовами, зумовленими погіршенням параметрів. Відмови обох видів залежать від тривалості роботи елементів, і з того моменту, як вони стають помітними, інтенсивність відмов починає більш менш швидко зростати. На мал. 32 показана узагальнена крива інтенсивності відмов транзисторів. Вона подібна до кривої на мал . 3 (лекція 5), за винятком того, що праворуч замість зносових відмов показані відмови через погіршення параметрів. Відмінність між тими та іншими відмовами полягає в тому, що, коли задають рівень навантаження, інтенсивність зносових відмов, грубо кажучи, є функцією лише тривалості роботи елемента, тоді як поява відмов через погіршення параметрів може бути відстрочена в результаті більш гнучкого проектування допусків схем, як і раніше, що рівень впливає елементи навантаження залишається незмінним. Очевидно, що у схемах, не чутливих до допусків, не буде і відмов із-за погіршення параметрів; їхнє місце займуть зносові відмови, хоча вони у багатьох випадках з'являться значно пізніше.

|  |
| --- |
| Мал. 32. Інтенсивність відмов транзистора (узагальнена характеристика, яка враховує лише найважливіші чинники)  1 – витоку; 2 – чистота поверхні; 3 – з'єднання; 4 – контроль атмосфери; 5 - циклічна теплова втома; 6 – атмосферні умови; 7 - герметичність і механічні властивості; 8 – високі механічні навантаження; 9 – періодичні високі електричні навантаження; 10 – висока температура; 11 – допуски проектування. |

Що ж до залежності від рівня навантаження, то відмови обох видів починають виникати раніше, якщо збільшувати рівні навантажень, у яких працюють елементи. Зменшення рівня навантаження затримує їхню появу. Отже, якщо на мал. 31 рівні навантажень зростуть, лінії 0% і 100% розійдуться швидше, а це означає, що 100% лінія перетне лінію проектного рівня схеми раніше. Все сказане справедливо і для 50% лінії. Середнє напрацювання на відмову через погіршення параметрів, що відбудеться приблизно близько точки перетину 50% лінії з лінією проектного допуску схеми, тим самим знизиться. Розподіл відмов через погіршення параметрів у часі для заданих проектного допуску схеми та рівня навантаження може бути отриманий за точками перетину ліній для різних відсотків (тобто 100, 99, 95, 90, 80, 70, 60 та 50%) з лінією проектного допуску схеми.

# Лекція 21. ДОВІРНІ ІНТЕРВАЛИ

Оцінки середнього доробку на відмову *m*, середньої довговічності *М* і стандартного відхилення σ, отримані, як було описано в попередньому розділі, представляють так звані *точкові оцінки* істинних невідомих параметрів. Яка достовірність цих оцінок?

Відомо, що статистичні оцінки наближаються до справжніх значень зі збільшенням обсягу вибірки. Таким чином, є тісний зв'язок між точністю оцінки та обсягом вибірки, на підставі якої вони отримані. Тільки нескінченно велика вибірка може дати 100% впевненість у тому, що оцінка параметра збігається з його істинним значенням. Надалі ми терміном «коефіцієнт довіри» позначатимемо ймовірність, що пов'язує справжнє значення параметра та його оцінку.

Коли оцінка параметра отримана для вибірки досить великого обсягу, логічно припустити, що справжнє значення цього параметра буде десь поблизу оцінки, праворуч або ліворуч від неї. Отже, доцільніше висловлювати статистичні оцінки з допомогою деякого інтервалу із зазначенням ймовірності, чи коефіцієнта довіри, те, що справжнє значення лежить усередині цього інтервалу, ніж знаходити точкові оцінки. Саме так і роблять, коли запроваджують довірчі межі для точкових оцінок, отриманих на основі статистичних випробувань.

Довірчі інтервали біля точкових оцінок мають нижню довірчу межу Г, і верхню довірчу межу И. Якщо, наприклад, обчислюють довірчі межі для ймовірності, скажімо, близько 90%, то це означає, що в 90% випадків справжнє значення лежатиме в межах обчислених меж , тоді як у 10% випадків воно буде лежати поза цими межами, нижче або вище за них. Очевидно, що, якщо бажано збільшити коефіцієнт довіри, скажімо, до 99%, тобто так, щоб у 99% випадків справжнє значення лежало між довірчими межами, довірчий інтервал навколо точкової оцінки стане значно ширшим, або потрібно збільшити обсяг вибірки, на підставі якої було отримано точкову оцінку.

Для обчислення довірчих кордонів необхідно мати більше відомостей про статистичний розподіл оцінки. Поняття статистичного розподілу оцінки легко пояснити з прикладу середнього значення нормального розподілу. Якщо з деякої генеральної сукупності вилучено вибірку n елементів, про яку відомо, що відмови в ній мають нормальний розподіл (знос), а випробування на довговічність проводиться доти, доки не відмовлять всі елементи, тобто поки не відбудеться n відмов і , Отже, поки не буде отримано n моментів часу зносових відмов, можна підрахувати оцінки середньої довговічності:



та стандартного відхилення довговічностей елемента:



Незміщена оцінка стандартного відхилення дорівнюватиме:



Якщо взяти ще кілька вибірок n елементів з тієї самої генеральної сукупності, то для кожної з них будуть отримані відмінні значення  і *s*. Очевидно, що отримані оцінки  будуть певним чином розподілені щодо істинного значення *М* генеральної сукупності, а оцінки *s* – істинного значення σ.

Якщо є генеральна сукупність із нормальним розподілом, то оцінки середньої довговічності, отримані з кількох вибірок, також матимуть нормальний розподіл щодо справжнього значення *М* генеральної сукупності. Отже, можна сказати, що оцінка середнього значення нормальної генеральної сукупності нормально розподілено щодо справжнього середнього значення. Однак, у той час як довговічність окремих елементів розподілена щодо *М* зі стандартним відхиленням σ, оцінка середньої довговічності, отримана для вибірки *n* елементів з числом *n* зареєстрованих відмов, розподілена щодо справжнього середнього значення довговічності генеральної сукупності зі стандартним відхиленням, рівним:

 (21.1)

де σ – справжнє стандартне відхилення довговічності елемента. Стандартне відхилення σ(*М*) оцінок довговічності від середнього значення довговічності називається *стандартною помилкою*. У цьому випадку позначення σ(*М*) використовується лише за необхідності чіткого розмежування між поняттями «стандартне відхилення довговічності елемента» та «стандартне відхилення оцінок довговічності».

Вираз (21.1) дозволяє безпосередньо встановити довірчі межі для оцінки середнього значення, отриманого після випробування великої партії зразків. З нормованої кривої нормального розподілу відомо, що справжнє значення *М* приблизно в 68,3% випадків лежатиме в межах  стандартної помилки σ(*М*) вимірюваної оцінки , приблизно в 95,4% випадків в межах  і приблизно в 99,7% випадків в межах . Імовірності, виражені у відсотках для інтервалу  (тобто 68,3; 95,4 і 99,7%), є коефіцієнти довіри для відповідних інтервалів і визначаються площами, обмеженими кривою нормального розподілу та відповідними межами інтервалів. Коефіцієнт *k* є процентне значення на осі абсцис нормованої кривої нормального розподілу для певної площі, обмеженою кривою. Таким чином, *k* відповідає кількості стандартних відхилень σ(М) від середнього значення, яке може бути отримано з таблиць нормального розподілу для будь-якої заданої ймовірності. У даному випадку *k* показує кількість стандартних помилок, яку слід відняти або додати до отриманої оцінки  для того, щоб визначити верхню та нижню довірчі межі при заданому коефіцієнті довіри. Довірчий інтервал тоді буде заданий таким виразом:

 (21.2)

У таблицях нормального розподілу зазвичай вказані площі, обмежені "хвостами" кривою нормального розподілу. Для *k*=1, т. е. одного стандартного відхилення від середнього, табличне значення цієї площі дорівнює 0.1587. Площа, що лежить поза інтервалом «стандартне відхилення», дорівнює . Площа всередині цього інтервалу тоді дорівнює . Якщо позначити площу однієї хвостової ділянки кривою через α/2 у точці, що відповідає відсотковому значенню *k*=*k*α/2, то площа в інтервалі  дорівнюватиме (1-α). Відповідний коефіцієнт довіри тоді дорівнює 100(1-α) %. На мал. 33 ця залежність показана графічно. Якщо на мал. 33 за початок координат прийняти оцінку середньої довговічності , то нижня довірча межа дорівнюватиме:

 (21.3)

а верхня довірча межа:

 (21.4)

Величина *М* знаходиться в інтервалі між *L* і *U* з ймовірністю (1-α), що виражається такою рівністю:

 (21.5)

|  |
| --- |
| Мал. 33. Двосторонній коефіцієнт довіри, довірчий інтервал та його межі |

Якщо за результатами випробувань на зношування відомі довговічності *n* елементів і підраховані їх середні значення  та стандартні відхилення *s* і якщо *n* настільки велике, що можна покласти , верхня та нижня довірчі межі можуть бути безпосередньо отримані з наступної таблиці для зазначених коефіцієнтів довіри:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Kα/2 | Двосторонні довірчі інтервали | Коефіцієнт  довіри  100(1-α) % |
| 0.84 |  | 60.0 |
| 1.00 |  | 68.3 |
| 1.28 |  | 80.0 |
| 1.50 |  | 86.6 |
| 1.64 |  | 90.0 |
| 1.96 |  | 95.0 |
| 2.00 |  | 95.4 |
| 2.58 |  | 99.0 |
| 3.00 |  | 99.7 |
| 3.29 |  | 99.9 |

Строго кажучи, ця методика визначення довірчих інтервалів оцінки буде правильною лише в тому випадку, коли відомо справжнє стандартне відхилення довговічностей елементів, які використовуються замість *s* у таблиці, наведеній вище. Однак вона може застосовуватися в обчисленнях надійності як апроксимацію, якщо величина *s* як оцінка величини σ отримана з вибірки великого обсягу, тобто коли кількість відмов принаймні дорівнює 25 (а бажано ще більше цієї величини).

Зазвичай нижня довірча межа *L* середньої довговічності представляє більший інтерес, ніж верхня межа. Коли величина *L* обчислюється, як показано вище, від неї віднімають число *k* стандартних відхилень довговічності елементів σ, відповідне вимогам надійності (див. лекції 6 – 8 і 19). В результаті одержують величину інтервалу часу між замінами або оглядами елементів:

 (21.6)

Коли цікавить лише нижня довірча межа *L*, використовуються звані «односторонні» довірчі кордону. У технічних умовах найчастіше зустрічається вимога у тому, що середня довговічність має перевищувати задане мінімальне значення при встановленому коефіцієнті довіри, що дорівнює 100(1-α)%. Вважатимемо, що задане мінімальне значення є нижньою довірчою межею *L*, а верхня межа дорівнює нескінченності. Завдання у тому, щоб забезпечити замовнику впевненість, що з ймовірності (1-α) справжня середня довговічність досягає чи перевищує заданий мінімум. Це означає, що існує ймовірність α того, що справжнє значення *М* буде меншим за заданий мінімум.

Якщо у випадку двосторонніх довірчих меж площа, що дорівнює α/2, обмежувалася лівою ділянкою кривої нормального розподілу, то тепер площа, що лежить вліво від *L*, дорівнюватиме α, а площа, що лежить праворуч, (1-α). Точка, що виражає відсоткове значення, відповідне *L*, тепер дорівнює *k*α, і можна записати:

 (21.7)

Отже, оцінка середньої довговічності, отримана з випробувань, повинна дорівнювати:

 (21.8)

Якщо результати випробування показали, що  не задовольняє нерівності (21.8), то вимога замовника, щоб справжнє значення *М* було принаймні рівним *L* при заданому коефіцієнті довіри 100(1-α)%, не буде виконано.

Нижче наведена таблиця, в якій використано припущення , дає можливість швидко перевірити, чи задовольняє оцінка , отримана для партії з *n* зразків, на вимогу, що справжнє значення *М* не менше заданого мінімуму *L*.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Kα | Оцінка  повинна  перевищувати | Заданий  коефіцієнт  довіри  100(1-α) % |
| 0.25 |  | 60 |
| 0.52 |  | 70 |
| 0.84 |  | 80 |
| 1.28 |  | 90 |
| 1.64 |  | 95 |
| 2.33 |  | 99 |

Як згадувалося вище, ця методика може бути використана, якщо кількість зразків у партії принаймні дорівнює 25. Однак аналогічні обчислення застосовні також і до менших партій; в цьому випадку, однак, вже не можна припустити, що , і слід скористатися іншими співвідношеннями, що базуються на t-розподілі Стьюдента. Фактично, все, що в цьому випадку необхідно зробити, це замінити точки відсоткових значень kα/2 і kα в отриманих вище виразах табульованими відсотковими значеннями kα/2; n-1 та kα; n-1 для t-розподілу, де n-1 називають ступенями свободи, а n – кількість відмов.

Для двостороннього довірчого інтервалу при коефіцієнті довіри 100(1-α)% одержують такі довірчі межі:

 (21.9)

а для односторонньої нижньої межі при тому самому коефіцієнті довіри:

 (21.10)

Вираз (21.8), що визначає допустиме мінімальне значення оцінки  при заданому мінімальному значенні *L* істинної середньої довговічності *М*, набуває вигляду:

 (21.11)

Якщо завдання полягає в тому, щоб за параметрами  і *s*, отриманими при випробуванні тільки невеликої партії, визначити інтервал часу між замінами або оглядами елемента, то припущення  не може бути прийняте і стандартне відхилення у виразі (21.6) має бути замінене його верхньою довірчою межею *s*в . Обчислення довірчих меж стандартних відхилень ґрунтується на «χ2-розподілі». Можна показати, що ставлення



має χ2-розподіл з (*n*-1) ступенями свободи. Верхня одностороння довірча межа стандартного відхилення елементів при довірчому коефіцієнті (1-α) дорівнюватиме:

 (21.12)

У цій формулі *s* – оцінка стандартного відхилення елементів, отримана при випробуваннях *n* елементів, результатом яких стало *n* вимірів довговічностей елементів *t*i, тобто:



а відсоткове значення  для *n*-1 ступенів волі визначається за таблицями χ2-розподілу.

У цьому випадку вираз (21.12) дає 100(1-α)% гарантію в тому, що справжнє стандартне відхилення довговічності елемента не перевищує значення *s*в. Таким чином, для вибірки малого обсягу формула (21.6), що дає інтервал часу між замінами або оглядами, має такий вигляд:

 (21.13)

# Лекція 22. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ

Методи оцінок параметрів надійності елементів та визначення довірчих меж, описані у двох попередніх лекціях, однаково застосовні і до оцінок надійності систем. Однак у цій лекції обговорюватимуться деякі особливості цих оцінок.

Система є поєднанням елементів, з'єднаних таким чином, щоб отримати єдине ціле і забезпечити виконання однієї або декількох заданих функцій. З точки зору визначення надійності розрізняють системи двох типів: *ремонтовані* або *відновлювані*, призначені для виконання протягом тривалого часу великої кількості завдань або операцій, і *неремонтовані*, або, точніше, *невідновлювані* системи одноразової дії.

Надійність системи здебільшого визначається її конструкцією. Проте надійність систем, що відновлюються, на наступних стадіях роботи залежить від способу їх експлуатації, тобто від ремонту, заміни деталей і планових оглядів. У лекції 7 було відзначено різку різницю між практиками профілактичного і лише ремонтного обслуговування. При ремонтному обслуговуванні очікують, коли у працюючій системі відбудеться відмова, та елементи замінюються лише тоді, коли вони відмовляють. Зношування елементів грає при цьому домінуючу роль (див. мал. 5 в матеріалах СРС до лекції 7), і інтенсивність відмов у системі встановлюється на рівні, набагато більшому початкового. Знову виготовлена ​​та припрацьована система переважно вільна від зносових відмов, і її надійність обумовлюється інтенсивністю раптових відмов. Значення, отримане при визначенні надійності такої нової системи, не може бути використане після декількох тисяч або сотень годин роботи, якщо не практикується обслуговування, що попереджає знос.

Як показує ретельніший розгляд графіка (див. мал. 5 у матеріалах СРС до лекції 7) тільки протягом порівняно короткого періоду можна чекати, що це відмови відсутні, і якщо й виникають якісь відмови, то лише раптові. У цей початковий період профілактична заміна елементів не є обов'язковою, оскільки вона не в змозі запобігти раптовим відмовам. Отже, протягом початкового періоду елементи замінюються лише після їхньої раптової відмови.

Протягом цього періоду надійність системи змінюється за експонентним законом, а інтенсивність раптових відмов елементів залишається постійною. По закінченні цього періоду починає позначатися зношування елементів, і якщо практикується тільки ремонтне обслуговування, інтенсивність відмов системи різко зростає, потім деякий час коливається і, нарешті, встановлюється на порівняно високому постійному рівні. Висока, але постійна інтенсивність відмов, що встановилася, в основному викликана зносом елементів. У цьому стаціонарному стані надійність системи знову описується експоненційною формулою, але інтенсивність відмов буде значно вищою, ніж при виникненні лише раптових відмов.

У проміжках між цими двома крайніми станами (тобто початковим станом, коли відбуваються тільки раптові відмови, і станом, коли зносові відмови мають постійну інтенсивність, яка накладається на інтенсивність раптових відмов) система проходить через ряд станів зі змінними коливальними інтенсивностями відмов. Коли потрібна висока надійність, ціль профілактичного обслуговування полягає в усуненні можливості такого стану системи, при якому зносові відмови можуть помітно вплинути на її роботу.

Інтервали часу, через які необхідне виконання заходів щодо профілактичного обслуговування, визначаються шляхом дослідження характеристик зносу різних елементів, що входять до системи. Як правило, цей інтервал різний для різних елементів і обчислюється в результаті випробувань на зношування, як показано в лекції 20. На базі таких випробувань визначаються оцінки середньої довговічності елементів та стандартного відхилення, і ця інформація дає можливість визначити оптимальний час для заміни або ремонту елементів кожного типу.

При правильному профілактичному обслуговуванні всіх елементів, про які відомо, що вони зношуються, система, що відновлюється, може працювати з певною інтенсивністю раптових відмов протягом необмежено великого періоду часу. Навіть після численних заходів профілактичного обслуговування та ремонту така система може залишатися такою ж працездатною, як і нова. Таким чином, поняття довговічності системи не застосовується до систем із профілактичним обслуговуванням. Строго кажучи, такого поняття як «середня довговічність систем» не існує. Якщо система відмовляє, це зазвичай зовсім не означає, що її не можна більше використовувати, якщо ж відмовляє невідновлюваний елемент, то він більше не застосовується. Якщо раптових відмов елементів не відбувається і система, отже, працює безвідмовно протягом деякого тривалого періоду часу, повинен настати момент, коли один з елементів відмовиться через знос, якщо він не був замінений при профілактичному обслуговуванні, але це не завжди означає, що вся система стала непридатною.

Таким чином, якщо від системи потрібно, щоб вона працювала протягом тривалого часу без обслуговування і, отже, належала до категорії «неремонтованих» або «невідновлюваних» систем, то інтенсивність раптових відмов має бути винятково малою. Імовірність того, що будь-який з елементів системи відмовить через знос протягом заданого періоду роботи без профілактичного обслуговування, також має бути дуже малою. У зв'язку з тим, що довговічність елементів здебільшого обмежена, величини напрацювань у про несистемних системах також дуже обмежені.

Іншими словами, у системах тривалого використання має бути забезпечене профілактичне обслуговування, якщо потрібна безвідмовна робота системи протягом тривалого часу, а інтенсивність раптових відмов у такій системі має бути дуже низькою.

У всіх практичних завданнях в оцінці надійності системи обмежуються експоненційним випадком, т. е. періодом, коли система нова чи припрацьована, але ще виникають зносові відмови. Інформація про надійність у результаті випробувань не всієї системи, та її окремих елементів. Фактично, інформація про довговічність елементів повинна бути відома до того, як система спроектована, оскільки ця інформація визначає плани профілактичного обслуговування. Для невідновлюваних систем з великою довговічністю, які повинні працювати без обслуговування (космічні кораблі тощо), інформація про зношування елементів визначає тип та обсяг резервування, яке має бути враховано в системі при проектуванні для боротьби зі зношуванням. З обережності слід сказати кілька слів щодо використовуваних способів резервування. Очевидно, що так званий «навантажений резерв» практично не захищає від зносу, замість нього в таких системах повинен використовуватися «ненавантажений» резерв, оскільки середня довговічність дубльованої системи з «навантаженим» резервом залишається майже колишньою, тоді як при використанні «ненавантаженого» резерву довговічність майже подвоюється. "Навантажений" резерв хороший тільки для захисту системи від раптових відмов.

Так само як і для елементів, оцінка надійності систем, що відновлюються, полягає в оцінці середнього напрацювання системи на відмову шляхом визначення відрізка часу між двома послідовними відмовими під час випробувань. Для цього одну або кілька однакових систем змушують працювати в імітованих умовах зовнішнього середовища та вимірюють сумарне напрацювання *Т* і число раптових відмов *r*, що виникли в процесі випробування. Найкраща оцінка середнього доробку на відмову тоді дорівнює:

 (22.1)

Якщо випробовується лише одна система, величина *Т* буде просто робочим часом системи *t*раб протягом випробування. Періоди простою, коли система вимикається в нічний час або на час ремонту, виключаються із розрахунку напрацювання. Якщо випробування такої системи припиняється точно в момент *r*-го відмови, сумарне напрацювання *Т* дорівнює:

 (22.2)

де *t*i – напрацювання між двома послідовними відмовами.

З іншого боку, якщо випробування припиняють у заздалегідь заданий момент часу, коли система пропрацює *t*j годин з моменту останньої відмови, а в момент припинення випробування система все ще залишається працездатною, сумарне напрацювання дорівнює:

 (22.3)

Коли *n* систем працює одночасно, сумарне напрацювання складає:

 (22.4)

де *t*раб, k – час роботи кожної системи. Очевидно, що при одночасному припиненні випробувань кількох систем незалежно від того, чи відмовить до моменту припинення випробувань одна з систем, інші системи можуть бути ще працездатними і кожна з них матиме певний напрацювання *t*j з моменту останньої відмови. Щоб отримати сумарне напрацювання, ці напрацювання слід скласти.

Описаний метод оцінки середнього напрацювання на відмову системи застосовується до систем, надійність яких підпорядковується експоненційному закону. Якщо функція надійності системи R=exp(-*t*/*m*), слід оцінити тільки величину *m*, яка, будучи єдиним параметром у цій формулі, визначає *R* для будь-якого напрацювання *t*. Однак системи часто резервують, у зв'язку з чим їхня надійність уже не підпорядковується експоненційному закону. І тут для визначення надійності системи недостатньо знати параметр *m*. На мал. 34 побудовано криву надійності системи з резервуванням. Середнє напрацювання на відмову в цій системі дорівнює площі під кривою надійності:



Вона дорівнює часу *t*=*m* у точці, де вертикальна лінія, проведена через значення *m*, ділить на дві частини криву надійності таким чином, що площа I дорівнює площі II. Однак величина *m* не визначає форму кривої надійності, так як будь-які інші криві, і зокрема експоненційна, можуть мати такий самий середній напрацювання на відмову і для них буде задоволена умова рівності площ I та II (див. пунктирні криві на мал.34). Але жодна крива, крім суцільної кривої на мал. 34, не задовольнятиме вимоги про те, щоб надійність системи для напрацювання, скажімо, в *t*1 годин дорівнювала *R*(*t*1), як це показано на нашому графіку. Отже, щоб довести, що резервована система має необхідну надійність *R*(*t*1) для напрацювання *t*1, недостатньо оцінити її середнє напрацювання на відмову *m*, а повинні бути проведені випробування, які дадуть інформацію про дійсну форму кривої надійності системи.

|  |
| --- |
| Мал. 34. Система із резервуванням |

Один з методів випробувань базується на ймовірнісному визначенні надійності, згідно з яким оцінка надійності для будь-якого напрацювання дорівнює:

 (22.5)

де *N* – початкова кількість виробів, які піддалися випробуванню, а *S*(*t*) – кількість виробів, які працювали безвідмовно досі *t*. Припустимо, наприклад, що в момент *t*=0 розпочато випробування 100 однакових систем і кількість «вижили» систем *S*(*t*1), *S*(*t*2), *S*(*t*3) і т. д. підраховується через інтервали часу *t*1, *t*2, *t*3 і т. д. Для різних періодів роботи оцінки надійності повинні бути рівними:



Якби число поставлених на випробування систем було *N*, то в знаменнику замість 100 стояло б *N*. Ці випробування слід продовжувати доти, доки всі системи не відмовлять, і на підставі значень надійності, отриманих для різних напрацювань, тоді можна побудувати криву надійності системи . Такий непараметричний метод дає хороше наближення функції надійності системи, якщо *N* велике, а інтервали *t*1, *t*2, *t*3 і т. д. обрані досить малими порівняно із загальним часом випробувань.

При використанні зазначеного методу оцінки надійності систем з резервуванням важливо, щоб елементи, що відмовили, не замінювалися до тих пір, поки не відмовить весь резервований пристрій в цілому, привівши тим самим до відмови системи. Коли це станеться, весь резервований пристрій повністю замінюють і випробування продовжуються. Іншими словами, якщо бажано досліджувати загалом функцію надійності системи, не слід запроваджувати профілактичне обслуговування в період випробувань. Тільки таким чином можна отримати інформацію щодо ймовірності безвідмовної роботи системи за будь-якого напрацювання *t*. Одночасно отримують також інформацію про середнє напрацювання на відмову системи, коли вона працює без профілактичного обслуговування.

З іншого боку, часто потрібно, щоб система мала певну надійність *R*(*t*1) для точно заданого напрацювання *t*1. Щоб розрахувати цю надійність, можна знову взяти *N* систем і змусити їх працювати одночасно протягом заздалегідь вказаного часу *t*1, а потім визначити число систем, що вижили при цих випробуваннях. Якщо 99% систем виживе протягом часу *t*1, оцінка надійності системи для *t*1 буде 0,99. Довірчі межі можуть бути визначені на основі біномного розподілу *R*(*t*1), як це робиться при контролі якості. Якщо випробовується система з резервуванням, знайдена оцінка *R*(*t*1) справедлива тільки для такого режиму, коли в початковий момент періоду *t*1 всі елементи в резервованих пристроях були справними. Якщо випробовується система, що оглядається і ремонтується після великої кількості послідовно виконуваних завдань з певною тривалістю *t*1 годин кожна, знайдена оцінка *R*(*t*1) буде достатньо точною тільки для умов, коли всі резервовані елементи системи знаходяться в хорошому стані і ще не досягли стадії зносу.

Звичайно, можна провести випробування для *R*(*t*1) на одній системі і включати її *N* раз на періоди *t*1. Для швидкого отримання інформації можна випробовувати дві або кілька систем. Якщо система *N* разів включалася на *t*1 годин і при цьому *S* разів працювала безвідмовно, оцінка надійності системи дорівнюватиме *R*(*t*1)=*S*/*N*. Звідси видно, що кількість систем, що включаються *N* разів, несуттєво, хоча рекомендується, якщо це можливо, випробовувати не одну, а кілька систем, щоб бути впевненим у одноманітності процесу виготовлення.

Якщо приписана певна методика обслуговування, папример перевірка резервованих систем на відмову елементів після кожних десяти напрацювань *t*1 системи та (або) профілактична заміна елементів, схильних до зносу після кожних *x* годин дії системи, такі вимоги можуть бути включені до програми випробувань на надійність, але тоді випробування стають дуже тривалими.

При оцінці надійності системи важливо пам'ятати, що завжди необхідно точно встановлювати, для яких умов системи проводяться вимірювання, причому програму випробувань слід складати окремо для кожного окремого випадку, залежно від поставлених вимог та конструкції системи.

Особливим випадком оцінки надійності є послідовні випробування на відмінність, що використовуються, коли дійсна надійність системи або апаратури не становить інтересу, а потрібно лише переконатися, що надійність при заданому коефіцієнті довіри буде кращою за потрібне мінімальне значення.

Однак, перш ніж закінчити цю лекцію, згадаємо ще про так звані «випробування на ремонтопридатність» системи. Вони полягають у видаленні, ремонті, відновленні або заміні певних деталей та у вимірі в людино-годинах часу, який для цих операцій знадобиться відповідного технічного персоналу.

# Список літератури

1. Bazovsky I. Reliability. Theory and practice. Prentice-Hall Space Technology Series. Prentice-Hall International. London, 1961. (Базовский И. Надежность. Теория и практика. Пер. с англ. под ред. Левина Б.Р. М., Мир, 1965. 374 с.)
2. Lloyd D. K., Lipov M. Reliability: management, methods and mathematics. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1962. (Ллойд Д., Липов М. Надежность. Организация исследования, методы, математический аппарат. Пер. с англ. под ред. Бусленко Н.П. М. «Советское радио», 1964, 687 с.)
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. 2-е ид., перераб. и лоп., СПб, БХВ-Петербург, 2006, 704 с.
4. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Практикум. СПб, БХВ-Петербург, 2006, 560 с.
5. Половко А.М. Сборник задач по теории надежности / А.М. Половко, И.М. Маликов, А.Н. Жигарев, В.И. Зарудный // М. «Советское радио», 1972, 408 с.