МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО
МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Технічний сервіс та системи в АПК»

НАДІЙНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Методичні вказівки до практичної роботи №4

на тему: «**Визначення показників надійності технологічних систем при експоненціальному законі розподілу**»

для здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр»
спеціальності 208 «Агроінженерія»

2019

Надійність технологічних систем. Методичні вказівки до практичної роботи №4 для здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр» спеціальності 208 «Агроінженерія» - Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, 2019. – 28 с.

Розробник: доцент Болтянська Н.І.

Рецензент: доцент Паніна В.В.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри Технічний сервіс та системи в АПК протокол № від 2019 р.

Розглянуто і рекомендовано до впровадження в навчальний процес метод. комісією факультету МТ, протокол № від 2019 р.

Практична роботи №4
ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНОМУ ЗАКОНІ РОЗПОДІЛУ

МЕТА РОБОТИ – ознайомитись з методикою визначення показників надійності технологічних систем при експоненціальному законі розподілу.

1 ВКАЗІВКИ З САМОПІДГОТОВКИ ДО РОБОТИ

1.1 Завдання для самостійної підготовки (Додаток А)

Вивчити:

- показники надійності відновлюваних і невідновлюваних виробів.

Ознайомитись:

- з методикою визначення основних показників надійності відновлюваних і невідновлюваних виробів.

Скласти звіт по роботі:

- номер, найменування та мета роботи;
- показники надійності відновлюваних виробів;
- показники надійності невідновлюваних виробів.

1.2 Питання для самопідготовки

1.2.1 Показники надійності відновлюваних виробів.

1.2.2 Показники надійності невідновлюваних виробів.

1.3 Рекомендована література

1 Надійність техніки. Системи технологічні. Терміни та визначення: ДСТУ 2470-94. - К.: Держстандарт України, 1995. – 28 с.

2. Надійність сільськогосподарської техніки: Підручник. / М.І. Черновол, В.Ю. Черкун, В.В. Аулін та ін.; За заг. ред. М.І. Черновола.– Кіровоград: ТОВ «КОД», 2010. – 320 с.

2 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОБОТИ

2.1 Програма робіт

2.1.1 Вивчити:

- класифікацію відмов;
- основні характеристики експоненціального закону розподілу

2.1.2 Провести розрахунок:

- показників надійності технологічних систем, які підпорядковуються експоненціальному закону розподілу.

Скласти звіт та захистити роботу.

2.2 Теоретичні відомості

2.2.1 Відмови та їх класифікація

У теорії надійності розрізняють системи та елементи. Під **системою** розуміють сукупність спільно діючих елементів, що забезпечують рішення певних завдань. **Елемент** не має самостійного експлуатаційного призначення при рішенні конкретного завдання та виконує визначені функції системи. Ці поняття відносні, вони визначаються поставленими цілями дослідження.

Для характеристики стану об'єктів експлуатації застосовують такі терміни, як **справність, несправність, працездатний** чи **непрацездатний** стан. Кожний з цих станів характеризується сукупністю значень параметрів та якісних ознак, що встановлюються нормативно-технічною або конструкторською документацією. Працездатний об'єкт на відміну від справного задовольняє лише вимогам нормативно-технічної документації, виконання яких забезпечує його здатність виконувати потрібні функції. У зв'язку з цим "справний стан" ширше, ніж поняття "працездатний стан".

Об'єкт може бути несправним, але працездатним.

Під **граничним станом** розуміють такий стан об'єкта, при якому подальша експлуатація згідно з нормативно-технічною документацією неприпустима, чи недоцільна, або характеризується неусувним виходом параметрів за встановлені межі. Після настання граничного стану експлуатація об'єкта припиняється і він може бути відправлений в ремонт або списаний.

Основним поняттям в теорії надійності є **відмова** - подія, яка полягає у втраті об’єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто у порушенні працездатного стану об'єкта.

Для кожної машини ознаки відмови встановлюють нормативно-технічною документацією.

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

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

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

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

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

За впливом на стан виробу відмови поділяють на **функціональні** й **параметричні.** Наприклад, для насоса відмови, що зумовлюють його зупинку, належать до *функціональних*, а зменшення продуктивності або тиску нижче від граничного рівня — до *параметричних*. За

наявності параметричних відмов технічний об'єкт може працювати з відхиленням від технічних вимог.

Деталі машин в основному руйнуються під дією силових навантажень, тепла та світла, електричних і магнітних полів, хімічного середовища, тертя та ін.

Під дією цих чинників відбувається зміна стану машини. У деталях машини відбуваються такі перетворення:

а) пластична деформація, що призводить до збільшення напруги в матеріалі деталей;

б) утомлюваність у випадку, коли деталі зазнають статичних і циклічних навантажень (рами, вали, пружини та ін.);

в) теплове руйнування, що відбувається під дією нагріву деталей, при яких змінюється структура матеріалу і вони втрачають свої початкові властивості (циліндри, поршні, вкладиші підшипників та ін.);

г) хімічне (корозійне) руйнування – це руйнування матеріалів внаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії;

д) зношування машини внаслідок тертя.

Відмови поділяють на декілька видів: за причинами виникнення, характером прояву, впливом на працездатність та ін.

Класифікація відмов наведена на рис.1.

Рис. 1. Класифікація відмов

Відмови за причинами виникнення:

а) ***конструкційні –*** зумовлені помилками при проектуванні, порушенням вимог державних стандартів, заниженням запасу міцності та ін.;

б) ***виробничі*** – спричинені порушенням технології виготовлення, невиконанням вимог технічної документації, застосуванням неякісних матеріалів і т. п.;

в) ***експлуатаційні*** – є наслідком порушень умов роботи машини, різних ушкоджень, невиконанням правил експлуатації, низької кваліфікації обслуговуючого персоналу, старінням машини та ін.

На цю групу експлуатаційних відмов технічних об‘єктів харчової і переробної промисловості припадає близько 50 % усіх відмов за джерелом виникнення.

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

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

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

Відмови за характером прояву:

а) ***раптові*** – характеризуються різкою зміною параметрів, руйнуванням елементів конструкції, втратою герметичності та ін.;

б) ***поступові*** – є наслідком необоротних явищ, утомлюваності, зносу та ін.

Відповідно до характеру розвитку процесів та їх проявлення відмови можуть бути: *раптовими*, наприклад поломки деталей і заїдання пар тертя від перевантаження або через відсутність змащування; *поступовими за розвитком* і *раптовими за проявленням*, наприклад руйнування деталей або конструкцій від утоми матеріалу, коротке замикання внаслідок старіння ізоляції; *поступовими* (спрацювання,

корозія, накипання, забруднення фільтрів, затуплення різальних інструментів та ін.).

Відмови за ступенем впливу на працездатність машини:

а) ***часткова,*** яка призводить до нездатності об'єкта виконувати частину потрібних функцій;

б) ***повна,*** яка зумовлює повну нездатність технічного об'єкта виконувати будь-яку із потрібних функцій; *ресурсна*, внаслідок якої об'єкт досягає граничного стану;

в) ***критична,*** яка може спричинити травмування людей, значні матеріальні збитки чи інші неприйнятні наслідки.

Для машин, які виконують відповідальні функції або функції, пов'язані з життям людей, відмови поділяють на ***небезпечні*** та ***безпечні.***

Крім того, за можливістю передбачування відмови поділяють ***прогнозовані*** і ***непрогнозовані.***

Залежно від складності наслідків відмовам можна запобігати при технічному обслуговуванні, при середньому або капітальному ремонті. За місцем усунення їх поділяють на відмови, які усувають в експлуатаційних умовах, і відмови, які усувають в умовах спеціалізованих ремонтних підприємств або в експлуатаційних умовах.

Експлуатація майже всіх виробів передбачає три періоди, що характеризуються різною інтенсивністю відмов (рис.2): *1* – період припрацювання елементів виробу; *2* – період нормальної експлуатації; *3* – період інтенсивного спрацювання.

У кожному з цих періодів відмови, що переважають мають свої особливості. В першому періоді експлуатації виникають відмови припрацювання, пов'язані з тим, що не всі елементи виробу припрацювались, або з проявленням дефектів, що не були виявлені при його виготовленні. У 3-ому періоді відбуваються спрацьовані відмови, зумовлені тим, що стан основних функціональних елементів досягає граничного рівня і створюються умови для інтенсивної генерації відмов. Відмови 2-го періоду називають відмовами періоду нормальної експлуатації. Вони зумовлені несприятливим поєднанням різних причин, у тому числі частковим спрацюванням елементів, серед яких немає таких, які б переважали.

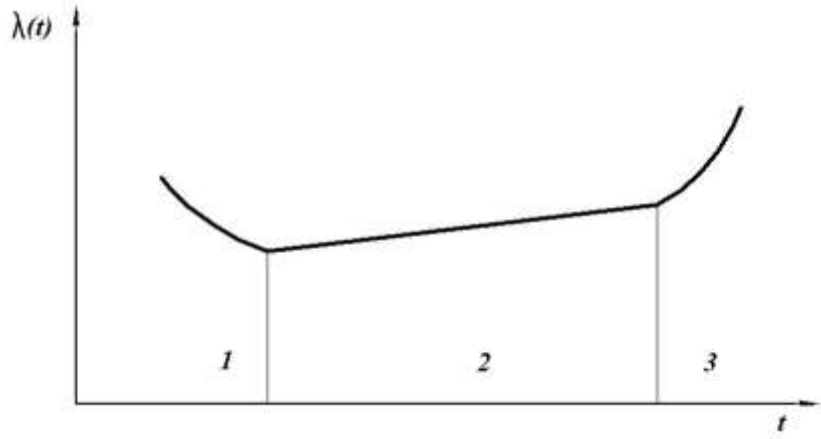

Рис.2. Характерні періоди експлуатації технічного об'єкта

У процесі експлуатації технічних об'єктів наслідки відмов супроводжуються прямими і побічними затратами. *Прямі затрати* пов'язані безпосередньо з відновленням працездатності виробу. *Побічні затрати* зумовлені вимушеними простоями обладнання, псуванням сировини та продукції, іноді людськими жертвами. На підприємствах харчових і переробних виробництв побічні затрати часто значно перевищують прямі.

За зв'язками з відмовами інших елементів бувають такі відмови: *залежні,* спричинені безпосередньо чи не безпосередньо відмовою іншого елемента технічної системи; *незалежні*, які не спричинені безпосередньо чи не безпосередньо відмовою чи несправністю іншого елемента.

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

За частотою виникнення (напрацювання) відмови розрізняють на *систематичні* та *випадкові*.

За впливом на втрати робочого часу об'єкта на лінії відмови поділяють на такі, що усуваються без втрат робочого часу і з втратами робочого часу.

2.2.2 Основні характеристики експоненціального розподілу

Експоненціальний розподіл являє собою однопараметричну функцію, в якій щільність розподілу напрацювання до відмови виражена простою, відомою з теорії ймовірностей, аналітичною залежністю

$$f(t) = c\exp(-ct), \qquad (1)$$

де c – параметр розподілу, який визначає положення кривої щільності розподілу на площині координат $f(t) - t$ і має розмірність [год$^{-1}$].

Криві щільності розподілу напрацювання до відмови $f(t)$ наведено на рис. 3.

Знайдемо аналітичні вирази для розрахунків показників надійності виробів з використанням даної моделі відмов. Згідно з (1) маємо

$$R(t) = 1 - \int_0^t c\exp(-ct)dt = 1 + \int_0^t \exp(-ct)d(-ct) =$$

$$= 1 + \exp(-ct)\Big|_0^t = 1 + \exp(-ct) - 1 = \exp(-ct). \qquad (2)$$

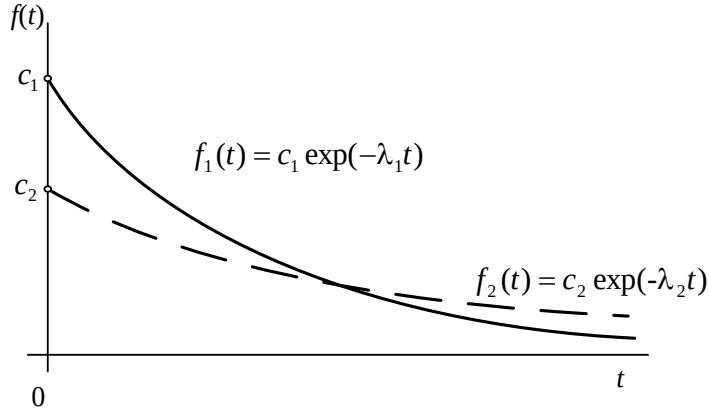

Рис. 3. Залежність *f*(*t*) в експоненціальній моделі відмов

Таким чином, ймовірність безвідмовної роботи елементів, виробів та систем при використанні для розрахунків експоненціальної моделі відмов визначається досить простою аналітичною залежністю (2). Проте, в цій простій залежності параметр розподілу *c* поки що залишається невідомим. Визначимо його, використовуючи фундаментальне співвідношення теорії надійності, яке пов'язує інтенсивність відмов зі щільністю їхнього розподілу на осі напрацювання та ймовірністю безвідмовної роботи:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{c\exp(-ct)}{\exp(-ct)} = c = \text{const}. \qquad (3)$$

Параметр *c* в експоненціальному розподілі чисельно дорівнює деякому константному значенню інтенсивності відмов розглянутих елементів, виробів чи систем, тобто експоненціальна модель описує відмову як явище, яке виникає зі сталою інтенсивністю $\lambda = c$, що, природно, обмежує область застосування моделі як з певними інтервалами напрацювання, так і для певних типів виробів.

З урахуванням (3) щільність розподілу напрацювання до відмови в експоненціальній моделі відмов

$$f(t) = \lambda\ \exp(-\lambda t). \qquad (4)$$

Складемо розрахункові залежності для оцінювання безвідмовності на основі даної моделі відмов. Використовуючи (2), можна записати

$$R(t) = \exp(-\lambda t)\ , \qquad (5)$$

а ймовірність виникнення відмови за напрацювання *t*:

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t).$$

З урахуванням (5) середнє напрацювання до відмови:

$$T_o = \int_0^\infty \exp(-\lambda t)dt = -\frac{1}{\lambda}\int_0^\infty \exp(-\lambda t)d(-\lambda t) = \frac{1}{\lambda}\exp(-\lambda t)\Big|_0^\infty\ .$$

Підставивши значення меж, остаточно отримаємо аналітичний зв'язок між параметром експоненціальної моделі – інтенсивністю відмов λ і середнім напрацюванням виробу до відмови:

$$T_{\text{o}} = \frac{1}{\lambda}. \qquad (6)$$

Це співвідношення дозволяє знайти оцінку параметра розподілу λ. Для цього необхідно обчислити на основі статистичних даних $\{t_i\}$ оцінку першого початкового моменту α_1^* даного розподілу, вважаючи її такою, що дорівнює T_{o}. Оцінку параметра експоненціальної моделі відмов знайдемо за залежністю $\lambda^* = 1/\alpha_1^*$.

Істотним обмеженням для застосування експоненціального розподілу як моделі відмов є неможливість урахування розсіювання напрацювання виробу до відмови. Для цього запишемо аналітичний вираз для дисперсії напрацювання до відмови, що, за визначенням, є другим центральним моментом випадкової величини *t*:

$$D[t] = \int_0^\infty (t - T_{\text{o}})^2 f(t)dt = \int_0^\infty \left(t - \frac{1}{\lambda}\right)^2 \lambda \exp(-\lambda t)dt = \\ = \lambda\left[\int_0^\infty t^2 \exp(-\lambda t)dt - \frac{2}{\lambda}\int_0^\infty t\exp(-\lambda t)dt + \frac{1}{\lambda^2}\int_0^\infty \exp(-\lambda t)\,dt\right]. \qquad (7)$$

Обчислимо перший інтеграл (у квадратних дужках (7)), застосувавши інтегрування вроздріб. Введемо позначення:

$$u = t^2;\ du = 2tdt;\quad dv = \exp(-\lambda t)dt;\quad v = -\frac{1}{\lambda}\exp(-\lambda t).$$

Тоді

$$I_1 = \int_0^\infty t^2 \exp(-\lambda t)dt = uv\Big|_0^\infty - \int_0^\infty v\,du = -\frac{t^2}{\lambda}\exp(-\lambda t)\Big|_0^\infty + \frac{2}{\lambda}\int_0^\infty t\exp(-\lambda t)dt.$$

Перший доданок у цьому виразі при підстановці верхньої межі перетворюється на нуль, оскільки $\exp(\lambda t)$ збільшується швидше, ніж t^2; другий доданок скорочується з аналогічним виразом у (7) зі знаком „–“. Остаточно одержуємо:

$$D[t] = \lambda\left[\frac{1}{\lambda^2}\int_0^\infty \exp(-\lambda t)dt\right] = -\frac{1}{\lambda^2}\int_0^\infty \exp(-\lambda t)d(-\lambda t) =$$

$$= -\frac{1}{\lambda^2}[\exp(-\lambda t)\Big|_0^\infty] = -\frac{1}{\lambda^2}[0-1] = \frac{1}{\lambda^2}.$$

Середнє квадратичне відхилення напрацювання до відмови від центра розсіяння T_o: $\sigma = \sqrt{D[t]} = 1/\lambda$, тобто дорівнює значенню середнього напрацювання T_o, внаслідок чого коефіцієнт варіації напрацювання до відмови в експоненціальній моделі відмов завжди дорівнює одиниці**:** $\nu = \sigma/T_o = 1$.

Аналогічно можна показати, що фіксованим є не тільки другий, але також третій і четвертий моменти експоненціального розподілу (коефіцієнт асиметрії завжди дорівнює двом, коефіцієнт ексцесу – дев'яти). Це змушує дослідників користуватись тільки математичним сподіванням, тоді як показники безвідмовності істотно залежать від розсіяння (розкиду) напрацювання.

Особливість цієї моделі відмов обумовлена її простотою. Для цього знайдемо аналітичний вираз для параметра потоку відмов $\omega(t)$ і запишемо зображення за Лапласом щільності експоненціального розподілу напрацювання до відмови (4):

$$\overline{f}(s) = \frac{\lambda}{\lambda + s}.$$

Підставивши $\overline{f}(s)$ у вираз, одержимо зображення за Лапласом для параметра потоку відмов:

$$\overline{\omega}(s) = \frac{\lambda/(\lambda + s)}{1 - \lambda/(\lambda + s)} = \frac{\lambda}{s}.$$

Оригіналом цього зображення є

$$\omega(t) = \lambda = \text{const}. \qquad (8)$$

Таким чином, в експоненціальній моделі відмов параметр потоку відмов не залежить від напрацювання і чисельно дорівнює значенню параметра розподілу (інтенсивності відмов). Через цей збіг показників деякі фахівці у своїх дослідженнях ототожнюють "інтенсивність відмов" (показник безвідмовності невідновлюваних виробів) з "параметром потоку відмов" (показником безвідмовності відновлюваних виробів), не враховуючи того, що насправді емпіричні (реальні) характеристики цих показників мають зовсім різні закономірності у часі.

Рисунок 4 ілюструє співвіднесеність емпіричних залежностей інтенсивності відмов і параметра потоку відмов від напрацювання з теоретичними залежностями (3) і (8), які випливають із експоненціальної моделі відмов зі щільністю розподілу (4).

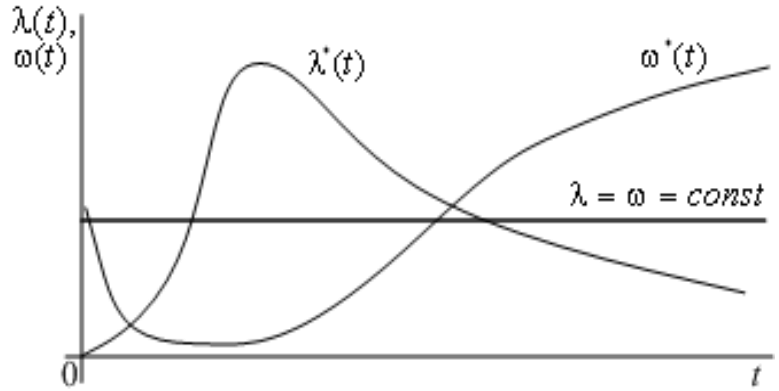

Рис. 4. Емпіричні залежності $\lambda^*(t)$ і $\omega^*(t)$ та параметр $\lambda = \omega$ експоненціальної моделі розподілу відмов

Ця ілюстрація наочно показує, що експоненціальний розподіл є досить „грубою" моделлю розподілу відмов, що „вирівнює" принципово різні показники – емпіричні $\lambda^*(t)$ і $\omega^*(t)$. Методика одержання статистичних даних для оцінювання інтенсивності відмов $\lambda^*(t)$ принципово відрізняється від умов одержання статистики відмов для оцінки параметра потоку відмов $\omega^*(t)$. Експоненціальна модель відмов „не дозволяє розрізняти" середнє напрацювання до відмови T_o (показник

безвідмовності невідновлюваних систем) і середнє напрацювання на відмову T_1 (показник безвідмовності відновлюваних систем), оскільки:

$$T_1 = 1/\omega = 1/\lambda = T_o.$$

Експоненціальний розподіл був першою моделлю відмов, на основі якої розраховувалася безвідмовність елементів і технічних систем з самого початку появи теорії надійності як науки (середина XX ст.). Багато вчених і фахівців-практиків віддають перевагу цій моделі відмов завдяки її простоті, оскільки однопараметрична модель спрощує розв'язання задач надійності. Достатньо сказати, що всі оптимізаційні задачі у галузі надійності вирішувались з використанням тільки експоненціальної моделі. І модель виправдала своє призначення, адекватно відображаючи статистику відмов елементної бази, яку використовували в технічних системах у 1950-1970 роках. Це спричинило досить істотний зсув вправо (по осі напрацювання) середнього значення (математичного сподівання) статистичного напрацювання до відмови T_o, внаслідок чого експоненціальний розподіл найчастіше не узгоджувався з реальною статистикою відмов.

Якісну динаміку (послідовне збільшення) середнього напрацювання до відмови з підвищенням надійності елементної бази наведено на рис. 5 у вигляді гістограм $f^*(t)$, які відповідають двадцятирічним періодам розвитку техніки і технологій. Практика змушує рахуватись з тим, що розподіл напрацювання до відмови високонадійної елементної бази має одномодальну форму, тому двопараметричний розподіл є більш адекватною функцією, здатною добре, гнучко апроксимувати подібну статистику.

Підстав вважати, що статистика буде іншою, немає. Спроби „підігнати" розрахункові показники безвідмовності систем, які отримані на основі експоненціального розподілу відмов, під реальні значення, що досягаються при експлуатації, за допомогою емпіричних коефіцієнтів говорять, природно, не на користь цієї моделі відмов.

Стала інтенсивність відмов λ у експоненціальній моделі надійності означає, що експоненціальний розподіл ніяк не враховує старіння, знос та інші деградаційні процеси, тобто виключає необхідність застосування якісніших матеріалів під час виробництва виробів або проведення профілактичних робіт в процесі експлуатації.

Щільність розподілу відмов у цій моделі максимальна в початковий період експлуатації, отже, модель відображає недосконалу технологію і якість проектування, виготовлення і складання.

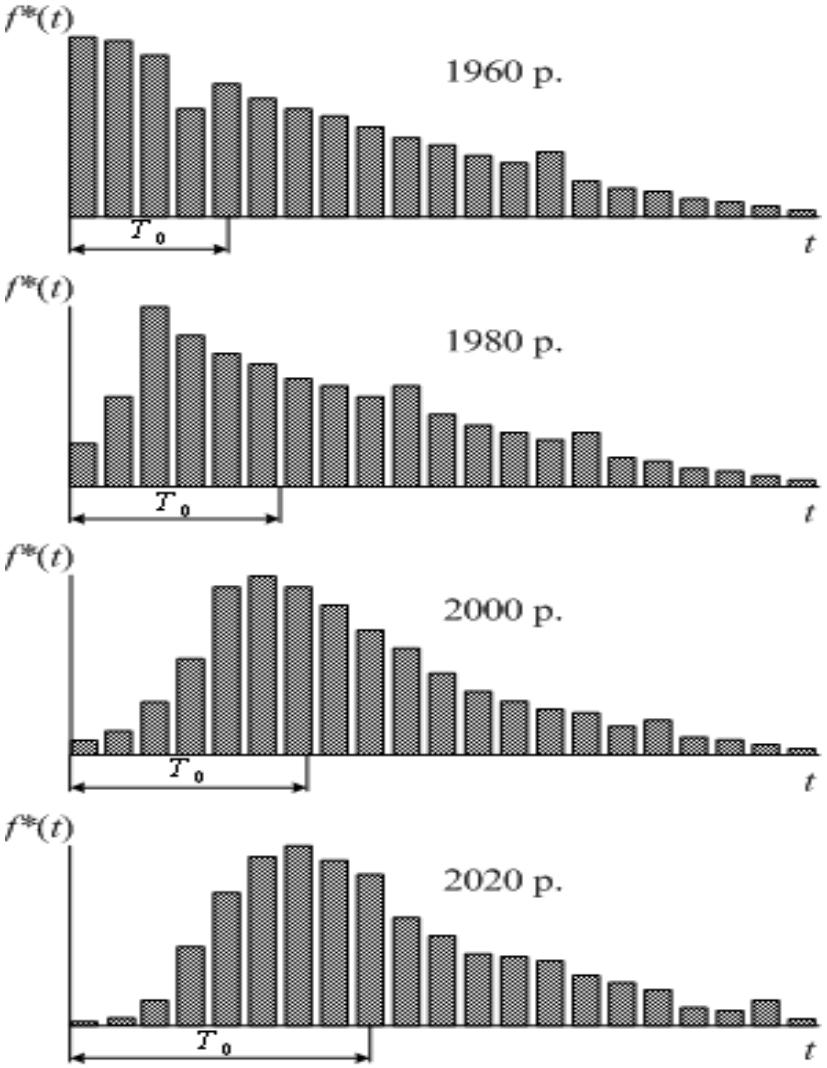

Рис. 5. Динаміка безвідмовності T_o^* елементної бази

Приклад. Напрацювання на відмову складної технологічної системи підкоряється експоненціальному закону розподілу з параметром $\lambda = 15 \cdot 10^{-5}$ год$^{-1}$. Визначити ймовірність безвідмовної роботи системи протягом 100 годин і знайти середнє значення напрацювання на відмову.

Рішення:

Визначимо ймовірність безвідмовної роботи при напрацюванні T через функцію розподілу експоненціального закону:

$$P(T) = 1 - F(x) = 1 - e^{-\lambda \cdot x}.$$

Після підстановки конкретних значень отримаємо:

$$P(100) = 1 - e^{-15 \cdot 10^{-5} \cdot 100} = 0{,}985.$$

Отже, ймовірність напрацювання 100 годин складає 98,5 %. Середнє значення напрацювання може бути визначене через параметр розподілу λ

$$T_o = \mu = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{15 \cdot 10^{-5}} = 6677 \text{ год.}$$

2.3 Завдання для самостійного вирішення

Засвоївши теоретичний матеріал, вирішити наступну задачу.

Напрацювання на відмову складної технологічної системи підкоряється експоненціальному закону розподілу з параметром $\lambda = 12 \cdot 10^{-5}$ год$^{-1}$. Визначити ймовірність безвідмовної роботи системи протягом 150 годин і знайти середнє значення напрацювання на відмову.

2.4 Хід проведення

2.4.1 Перевірка викладачем самостійної підготовки студентів до практичної роботи (наявність письмових відповідей на надані питання).

2.4.2 Викладач знайомить студентів з метою, змістом даної роботи та вимогами до захисту.

2.4.3 Вивчити показники надійності відновлюваних і невідновлюваних виробів, класифікацію відмов, основні характеристики експоненціального розподілу.

2.4.4 Ознайомитись з методикою визначення основних показників надійності відновлюваних і невідновлюваних виробів.

2.4.5 Провести розрахунок показників надійності технологічних систем, які підпорядковуються експоненціальному закону розподілу.

2.4.6 Самостійне опрацювання студентами теоретичних відомостей з даної теми та оформлення звіту.

2.4.7 Захист практичної роботи за допомогою тестів наприкінці заняття, при умові правильного оформлення звіту.

2.5 Після виконання роботи, студент складає звіт, який вміщує дані:

1. Найменування, номер та мету роботи;
2. Показники надійності відновлюваних і невідновлюваних виробів;
3. Класифікація відмов;
4. Основні характеристики експоненціального розподілу;
5. Розрахунок показників надійності технологічних систем, які підпорядковуються експоненціальному закону розподілу.

Пункти 1-2 студент виконує самостійно, як підготовку до практичних занять.

2.6 Контрольні запитання

2.6.1. Терміни, що характеризують стан об'єктів експлуатації.

2.6.2. Поняття «відмова».

2.6.3. Класифікація відмов.

2.6.4. Природа виникнення відмов.

2.6.5. Експоненціальний закон розподілу.

2.6.6. Параметри, якими характеризується експоненціальний закон розподілу.

ДОДАТОК А
(довідковий)

Показники надійності відновлюваних виробів

Відновлюваний об'єкт – це ремонтований об'єкт, який після відмови та усунення несправностей знову стає здатним виконувати потрібні функції, що задані кількісними показниками надійності. Відновлення полягає у відшуканні та заміні елементів (модулів, плат, субблоків і т.і.), які відмовили з подальшим регулюванням та перевіркою працездатності.

Показниками надійності відновлюваних виробів є:

- імовірність безвідмовної роботи P(t);
- параметр потоку відмов ω(t);
- показники довговічності:

а) середній ресурс $T_{р.\ сер}$ ($R_{сер}$), год;

б) середній термін служби $T_{сл.\ сер}$, років;

в) гамма-відсотковий ресурс T_{γ}, %.

Для **відновлюваних об'єктів**, у яких ймовірна багаторазова поява відмов, напрацювання на відмову – випадкова подія. Тому елементи, що відмовили, замінюють на справні і працездатність об'єкта відновлюється, тобто спостерігається потік відмов та потік відновлень.

Потік відмов характеризується двома величинами: середньою кількістю відмов $m_{сер}(t)$ та параметром потоку відмов $\omega(t)$.

Якщо випробовують або експлуатують N об'єктів, що відновлюються (ремонтуються), при цьому фіксується кількість відмов та напрацювань, при яких вони проявляються $m_1(t)$, $m_2(t)$, , ..., ..., $m_i(t)$, то загальна кількість відмов становитиме:

$$m_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N} m_i(t) \qquad (1)$$

Середня кількість відмов до напрацювання t, що наближено характеризує потік відмов, визначають за формулою:

$$\overline{m}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i(t)}{N} \qquad (2)$$

де N – кількість об'єктів, що відновлюються (ремонтуються), за випробуваннями або експлуатацією яких у заданих умовах проводять спостереження;

$m_i(t)$ – кількість відмов кожного з цих об'єктів до напрацювання t.

Переходячи до границі, отримують **характеристику потоку відмов:**

$$H(t) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} m_i(t) = \lim_{N\to\infty} \overline{m}(t). \qquad (3)$$

Параметром потоку відмов називають щільність ймовірності виникнення відмов відновлюваного об'єкта; визначається для певного моменту часу або напрацювання.

Параметр потоку відмов визначають за рівнянням:

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}. \qquad (4)$$

часто для визначення параметра потоку відмов, на підставі експериментальних даних, користуються наближеною формулою:

$$\hat{\omega}(t) = \frac{\overline{m}(t+\Delta t) - \overline{m}(t)}{\Delta t}, \qquad (5)$$

Виходячи з цієї формули можна бачити, що параметр потоку відмов – це середня кількість відмов об'єктів, що відновлюються (ремонтуються), за одиницю часу для досить малого проміжку часу Δt. При експоненціальному розподілі напрацювання між відмовами $\omega(t) = \lambda$ і статистична оцінка параметра потоку відмов визначається за формулою: $\hat{\omega}(t) = \hat{\lambda}$. Після періоду припрацювання $\omega(t) = \omega\text{const}$.

Якщо позначити через $Q(t)$ ймовірність появи відмови у проміжок напрацювання від t_1 до t_2, то параметр потоку відмов визначають за формулою:

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

тобто параметр потоку відмов за час t дорівнює ймовірності відмови об'єкта в одиницю напрацювання після цього напрацювання t.

Якщо об'єкт складається з кількох елементів, для яких визначені параметри потоку відмов, загальний параметр потоку відмов обчислюють за виразом:

$$\omega_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^{N} \omega_i \,, \qquad (7)$$

де N – кількість елементів об'єкта; ω_i – параметр потоку відмов i-го елемента.

Рівняння (7) визначає важливе положення, яке широко використовується у розрахунках надійності. Якщо скласти кілька потоків відмов, то параметр сумарного потоку відмов дорівнюватиме сумі параметрів всіх потоків.

Середнє напрацювання на відмову $T_1(t)$ залежить від параметра потоку відмов:

$$T_1(t) = \frac{1}{\omega(t)} \qquad (8)$$

Довговічність кількісно оцінюється за допомогою двох груп показників: ресурсу як показника, пов'язаного з напрацюванням об'єкта та терміном служби. Кожна з цих груп має багато різновидів, які дають змогу конкретизувати етапи або характер експлуатації.

Нормативними документами визначені такі показники довговічності:

1. **Гамма-відсотковий ресурс** $T_{p.\gamma}$, визначений як сумарне напрацювання, протягом якого виріб не досягне граничного стану з ймовірністю γ, вираженою у відсотках.

2. **Середній ресурс** T_p, визначений як математичне сподівання ресурсу.

Ці ресурсні показники оцінюють довговічність невідновлюваних виробів і збігаються з гамма-відсотковим і середнім напрацюванням до першої відмови.

3. **Гамма-відсотковий термін служби** $T_{сл.\gamma}$, що являє собою календарну тривалість експлуатації, протягом якої виріб не досягне граничного стану з ймовірністю γ, вираженою у відсотках.

4. **Середній термін служби** $T_{сл}$, який являє собою математичне сподівання терміну служби.

За цим терміном служби оцінюють довговічність відновлюваних виробів, її можна аналітично прогнозувати за заданими критеріями граничного стану.

Показники надійності невідновлюваних виробів

Об'єкт, для якого в даній ситуації проведення ремонту працездатного стану не передбачено в нормативно-технічній чи конструкторській документації чи не дозволяє відновити задані кількісні показники надійності називається ***невідновлюваним***. Такий об'єкт замінюється в цілому на новий чи інший справний, чим досягається відновлення працездатності складного об'єкта (функціональної системи) складовою частиною якого є даний об'єкт. Такий метод відновлення називається агрегатним.

Показниками надійності невідновлюваних виробів є:

- ймовірність безвідмовної роботи;
- ймовірність відмов;
- інтенсивність відмов;
- середній наробіток до відмови (середній час безвідмовної роботи).

Одним із важливих показників надійності невідновлюваних виробів є ймовірність безвідмовної роботи за проміжок часу *t*. Це ймовірність того, що за певних умов експлуатації в межах заданого проміжку часу роботи відмова не виникне.

Ймовірність безвідмовної роботи виробу *p(t)* за проміжок часу *t* можна розрахувати на основі показників надійності елементів, що складають даний виріб, або на основі статистичної обробки результатів випробувань великої кількості виробів даного типу. В цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи можна визначити за формулою:

$$p(t) \approx \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \qquad (9)$$

де N_0 - кількість виробів, що випробовувалися на протязі часу t;

$N(t)$ - кількість працездатних за час випробування виробів;

$n(t)$ - кількість виробів, що відмовили за час *t*.

Помилка розрахунку за формулою (9) тим менша, чим більша кількість виробів, що випробовуються.

Ймовірність безвідмовної роботи виробу *p(t)* за проміжок часу *t* пов'язана з імовірністю відмов *q(t)* за той же проміжок часу співвідношенням:

$$p(t)+q(t)=1 \tag{10}$$

Ймовірність того, що за час *t* виріб відмовить, за результатами статистичних випробувань, можна визначити за формулою:

$$q(t)\approx\frac{n(t)}{N_0} \tag{11}$$

де $n(t)$ - кількість виробів, що відмовили за час *t*;

N_0 - кількість виробів, що випробовувалися на протязі часу *t*.

У якості показника надійності невідновлюваних виробів використовується щільність розподілу наробітку до відмови *f(t)*.

Похідна ймовірності відмови *q(t)* за часом *t* характеризує щільність розподілу наробітку до відмови (часу безвідмовної роботи виробу), або швидкість «спадання» безвідмовності виробу:

$$f(t)=\frac{dq(t)}{dt}=-\frac{dp(t)}{d(t)} \tag{12}$$

З урахуванням виразу (11) маємо:

$$f(t)=\frac{dn(t)}{dt\cdot N_0}\approx\frac{\Delta n(t)}{\Delta t\cdot N_0} \tag{13}$$

Вираз (13) застосовується в тому випадку, коли всі вироби однотипні і випробовуються у однаковому режимі.

Найбільш розповсюдженим кількісним показником надійності є **інтенсивність відмов**, що являє собою відношення щільності розподілу наробітку до відмови до ймовірності безвідмовної роботи виробу, взяті для одного і того ж моменту часу:

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{p(t)} \tag{14}$$

Підставивши в (14) вирази (9) і (13), маємо:

$$\lambda(t)=\frac{dn(t)}{dt\cdot N(t)} \tag{15}$$

Інтенсивність відмов, отримана за результатами статистичних випробувань, визначається як відношення кількості виробів, що відмовили на протязі розглянутого проміжку часу, до добутку кількості виробів, які працездатні до початку цього проміжку, і його тривалості:

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n(t)}{N(t) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t)}{(N_0 - n(t)) \cdot \Delta t} \qquad (16)$$

де Δt - розглянутий проміжок часу;

$\Delta n(t)$ кількість виробів, що відмовили за проміжок часу Δt;

$N(t)$ - кількість виробів, що залишилися справними до розглянутого проміжку часу;

$n(t)$ - кількість виробів, що відмовили з початку випробувань до розглянутого проміжку часу Δt;

N_0 - кількість виробів, що випробовувалися.

Залежність інтенсивності відмов від часу, що представлена на рис. 1. має три періоди.

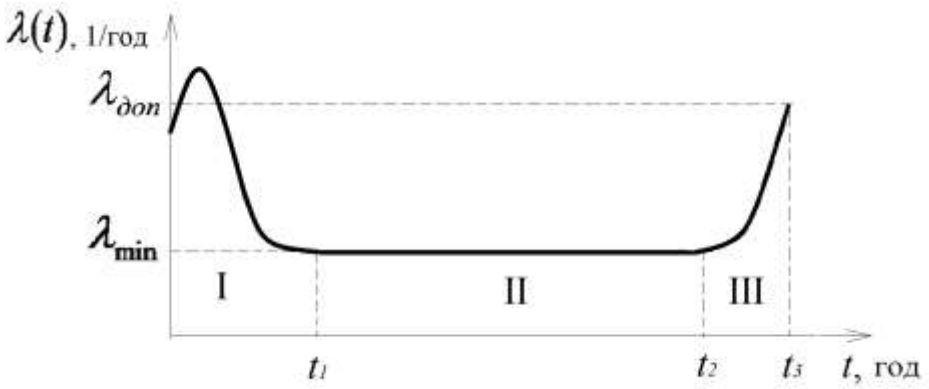

Рис. 1. Залежність інтенсивності відмов від часу

І період – період приробітку $(0 - t_1)$. Цей період характеризується високою інтенсивністю відмов, що обумовлено виходом з ладу ви-

робів, що мають приховані дефекти, які не вдалося виявити при їх виготовленні. Тривалість періоду приробітку складає частку відсотка часу нормальної роботи виробу. Період приробітку вважається завершеним, коли інтенсивність відмов наближується до $\lambda_{\min}$. Приробіточні відмови можуть бути наслідком конструктивних, технологічних та експлуатаційних помилок.

II період – період нормальної роботи $(t_1 - t_2)$. Цей період характеризується мінімальною і постійною інтенсивністю відмов. Величина $\lambda_{\min}$ тим менша, а інтервал тим більший, чим досконаліша конструкція, вища якість її виготовлення і більш ретельно дотримані режими експлуатації. Цей період складає десятки тисяч годин.

III період – період зносу і старіння $(t_2 - t_3)$. Цей період характеризується різким зростанням інтенсивності відмов через появу зносу і старіння матеріалів.

Завершується період III, а разом з тим припиняється експлуатація виробу, коли інтенсивність відмов наближається до максимально допустимого значення $\lambda_{доп}$.

Ймовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов пов'язані співвідношенням:

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \qquad (17)$$

Для II періоду нормальної роботи виробу, коли $\lambda(t) = \lambda_0 = const$,

$$p(t) = e^{-\lambda t} \qquad (18)$$

Отримана залежність має назву **експоненціального закону надійності**.

Ще одним показником надійності невідновлюваних виробів є **середній час безвідмовної роботи** або **середній наробіток до відмови** $t_{сер}$, що визначається за виразом:

$$t_{сер} = \int_0^\infty p(t)dt \qquad (19)$$

Якщо $p(t) = e^{-\lambda t}$, то вираз (19) має вигляд:

$$t_{сер} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda . \qquad (20)$$

Тоді

$$p(t) = e^{-t/t_{сер}} \qquad (21)$$

Статистично (за результатами випробувань) $t_{сер}$ визначається як відношення суми часу безперервної роботи кожного виробу до загальної кількості виробів, що випробовуються:

$$t_{сер} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{t_i}{N_0} \qquad (22)$$

де t_i - час безперервної роботи і-го виробу.

Усі розглянуті показники надійності невідновлюваних виробів є рівноправними. Проте на практиці перевага віддається інтенсивності відмов, оскільки ця функція легко визначається експериментально.