

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-66>

УДК 654.1

СУБАЧ ІГОР

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0000-0002-9344-713X>e-mail: subach1964@gmail.com**РОМАНЕНКО ВАДИМ**

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0000-0002-8668-177X>e-mail: roma_38@ukr.net**КОНОНОВА ІРИНА**

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0000-0001-6945-0323>e-mail: viti21@ukr.net**МОГИЛЕВИЧ ВАДИМ**

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0000-0003-2937-5327>e-mail: vadym.vadym63@gmail.com

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ В УМОВАХ АПРІОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення надійності електронно комунікаційних об'єктів та якості їх технічного обслуговування й ремонту в умовах апріорної невизначеності. Сучасні електронні комунікаційні системи є складними технічними комплексами, від безперервної роботи яких залежить якість зв'язку та інформаційного обміну. Використання підходів, що враховують відмови з часовим резервуванням, дозволяє розширити можливості оцінювання та прогнозування надійності електронного обладнання, що є важливим для забезпечення стабільного функціонування інфокомунікаційної інфраструктури.

У статті розкриті фундаментальні поняття надійності технічних систем та встановлено, що система з часовим резервуванням має особливі характеристики, які впливають на визначення критеріїв відмови та оцінку її надійності.

Проведений аналіз показав, що в таких системах відмова не обов'язково призводить до зриву функціонування, оскільки передбачено механізми відновлення працездатності в межах допустимого резервного часу. Таким чином, для оцінки надійності таких систем доцільно використовувати поняття "ймовірність безвідмовного функціонування" та "ймовірність зриву функціонування".

Наведено поодинокі та комплексні показники надійності систем із часовою надлишковістю та визначено, що поодинокі показники, такі як ймовірність безвідмовного функціонування, інтенсивність відмов і середній час напруження до відмови, дозволяють оцінити окремі властивості системи. Водночас комплексні показники, зокрема коефіцієнт готовності та коефіцієнт оперативної готовності, надають змогу оцінити ефективність роботи системи з урахуванням часових резервів і процесу відновлення працездатності. Особливу увагу приділено впливу технічного обслуговування та ремонту на надійність системи. Визначено, що якість виконання цих заходів безпосередньо впливає на експлуатаційну надійність об'єкта, а їх ефективність оцінюється за допомогою коефіцієнта технічного використання.

Ключові слова: електронне комунікаційне обладнання, мережі зв'язку, надійність, відмова, апріорна невизначеність, часове резервування.

SUBACH IHOR, VADYM ROMANENKO, IRYNA KONONOVA, MOHYLEVYCH VADYM

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

ANALYSIS OF METHODS FOR SOLVING PROBLEMS OF RELIABILITY INDICATORS ASSESSMENT UNDER CONDITIONS OF A PRIORI UNCERTAINTY

The relevance of the study is due to the need to improve the reliability of electronic communication facilities and the quality of their maintenance and repair under conditions of a priori uncertainty. Modern electronic communication systems are complex technical complexes, the uninterrupted operation of which affects the quality of communication and information exchange. The use of approaches that take into account failures with time redundancy allows to expand the possibilities of assessing and predicting the reliability of electronic equipment, which is important for ensuring the stable functioning of the information and communication infrastructure.

The article reveals the fundamental concepts of reliability of technical systems and establishes that a system with time redundancy has special characteristics that affect the definition of failure criteria and the assessment of its reliability.

The analysis shows that in such systems, a failure does not necessarily lead to a disruption of functioning, since mechanisms are provided to restore performance within the permissible reserve time. Thus, to assess the reliability of such systems, it is advisable to use the concepts of "probability of failure-free operation" and "probability of disruption of operation".

The article presents single and complex indicators of reliability of systems with time redundancy and determines that single indicators, such as probability of failure-free functioning, failure rate and average time between failures, allow to evaluate individual properties of the system. At the same time, complex indicators, such as the availability factor and the operational readiness factor, make it possible to assess the efficiency of the system, taking into account time reserves and the process of restoring performance.

Particular attention is paid to the impact of maintenance and repair on system reliability. It is determined that the quality of these activities directly affects the operational reliability of the facility, and their effectiveness is assessed by the technical utilization rate.

Keywords: electronic communication equipment, communication networks, reliability, failures, a priori uncertainty, time redundancy.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.04.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

З огляду на зростаючу складність інфокомунікаційної інфраструктури та необхідність її безперервної роботи, виникає проблема кількісного оцінювання показників надійності електронного комунікаційного обладнання та якості технічного обслуговування в умовах апіорної невизначеності.

Однією з головних складностей є те, що відмови електронно комунікаційних об'єктів не можуть бути точно спрогнозовані через недостатність вихідних даних або їхню варіативність. Це ускладнює оцінку показників надійності та вироблення ефективних стратегій технічного обслуговування і ремонту. Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є використання моделей, що враховують відмови з часовим резервуванням, що дозволяє отримати більш точні оцінки й забезпечити високу експлуатаційну ефективність електронних комунікаційних систем.

Аналіз досліджень та публікацій

Питання оцінки надійності електронних комунікаційних об'єктів та якості їх технічного обслуговування і ремонту є предметом численних наукових досліджень. У роботах провідних учених у сфері електронних комунікацій та технічної діагностики розглядаються різні підходи до моделювання збоїв та стійких відмов обладнання, включаючи ймовірнісні та статистичні методи оцінки надійності [1 – 3].

Значний внесок у розвиток цієї тематики зроблено в працях, присвячених теорії надійності технічних систем, де аналізуються математичні моделі збоїв та стійких відмов, а також застосування різних видів резервування, що використовуються для підвищення експлуатаційної ефективності електронного комунікаційного обладнання. Зокрема, широко досліджуються методи часового резервування, що дозволяють зменшити вплив збоїв та стійких відмов на загальну якість функціонування електронних комунікаційних систем [4 – 7].

Окрему увагу приділено проблемі апіорної невизначеності, яка виникає при оцінці показників надійності та якості технічного обслуговування. У науковій літературі розглядаються підходи до вирішення цієї проблеми, зокрема методи експертних оцінок, ймовірнісного аналізу та нечіткої логіки. Також досліджуються підходи до отримання двосторонніх оцінок показників надійності та визначення гарантованих значень показників якості функціонування, обслуговування та ремонту [8 – 10].

Незважаючи на значний обсяг досліджень, питання комплексного оцінювання надійності електронних комунікаційних об'єктів з урахуванням часового резервування та апіорної невизначеності потребує подальшого вивчення.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є аналіз способів вирішення задач оцінювання показників надійності в умовах апіорної невизначеності.

Виклад основного матеріалу

Фундаментальними поняттями в теорії та практиці надійності, з яких починається будь-яке дослідження надійності, є поняття «працездатність», «непрацездатність» і «відмова». У ДСТУ України [11] ці поняття визначено таким чином:

працездатність – стан об'єкта, за яком він здатний виконувати всі необхідні функції;

непрацездатність – стан об'єкта, за яким він не здатний виконувати хоча б одну з необхідних функцій;

відмова – подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкта, тобто у втраті об'єктом здатності виконувати необхідну функцію.

Наявність у системі різних видів надлишковості вносить деякі нові елементи у визначення цих понять, зумовлені розширенням фазового простору працездатних станів і необхідністю врахування часової траєкторії функціонування системи після відмов окремих елементів. Найбільшою мірою це проявляється в системах, у яких поряд з іншими видами застосовується і часова надлишковість. Як показує аналіз [12, 13], систему, у якій використовують часове резервування, зручно представити у вигляді деякої умовної системи, що складається із сукупності двох узагальнених елементів: вихідного резервного об'єкта, і резерву часу (рис. 1).

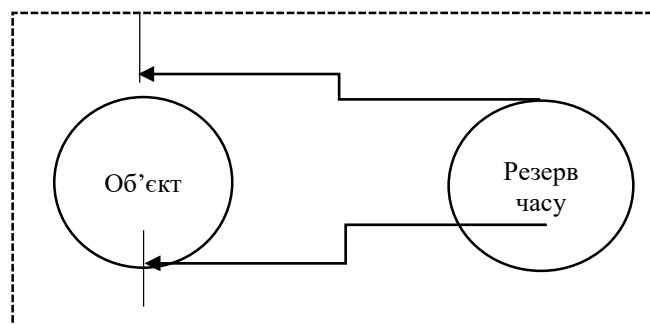


Рис. 1. Умовна система з часовим резервуванням (система об'єкт-час)

Схема використання резерву часу, представлена на рис. 1, аналогічна схемі структурного навантаженого дублювання заміщенням, оскільки після виникнення відмови об'єкта починає діяти резерв часу, у момент витрачання якого (при непрацездатному об'єкті) виникає відмова (зрив функціонування) умовної системи (системи об'єкт-час – ОЧ).

Елементи, зображені на рис. 1, будемо називати узагальненими, оскільки кожен із них може класифікуватися за низкою ознак. Зокрема, в об'єктах електронних комунікацій (ЕК) можуть бути реалізовані різні методи резервування (наприклад, структурного або навантажувального).

В подальшому під «резервованою системою» або «системою ОЧ» будемо розуміти умовну систему, яка представлена на рис. 1; під об'єктом – один із узагальнених елементів такої системи, а поняття «структурний елемент» або просто «елемент» означатиме частину об'єкта. Відмови об'єкта можуть відрізнятися за наслідками. Якщо відмова спричиняє лише затримку виконання завдання, але не призводить до повторення робіт, то її називають незначущою або неруйнівною. В протилежному випадку її називають значущою або руйнівною (значущою може бути повне або часткове). У випадку наявності значущих відмов усе напрацювання резервованої системи можна розділити на корисне і значуще. Корисним є напрацювання, не значуще відмовами апаратури. Значуще напрацювання – напрацювання, не включене в корисне.

Таким чином, для системи з часовим резервуванням порушення працездатності окремих елементів об'єкта не обов'язково супроводжується відмовою системи, оскільки є можливість відновити працездатність за резервний (допустимий) час. Тому під відмовою системи з часовим резервуванням розумітимемо подію, що полягає в порушенні працездатності, яке має неприпустимі наслідки або неусунута за допустимий час.

На основі цього загального визначення для кожного конкретного випадку використання надлишковості необхідно формулювати певні критерії відмови системи. Розглянемо це на прикладах систем із різними методами резервування.

У системі з поповнюваним резервом часу в якій прийнято лише одне обмеження (на час відновлення працездатності об'єкта $t_{\text{в}}$), відмова системи ОЧ виникає в момент, коли тривалість відновлення об'єкта $t_{\text{в}}$ перевищує допустиме значення, що визначається використовуваним у системі поповнюваним резервом часу $t_{\text{д}}$.

В одноканальній системі з непоповнюваним резервом часу $t_{\text{р}}$ і незначущими відмовами об'єкта відмова системи виникає в момент t , коли сумарні втрати робочого часу на відновлення працездатності об'єкта досягають значення виділеного резерву $t_{\text{р}}$, а сумарне корисне напрацювання об'єкта при цьому менше необхідної величини $t_{\text{з}}$ ($t_{\text{з}}$ – мінімальний час виконання завдання).

У системі зі структурним і часовим резервуванням (резерв часу $t_{\text{д}}$ поповнюється і витрачається під час під'єднання резервних елементів, початкове число яких m) відмова системи виникає в момент виконання нерівності $t_{\text{н}} > t_{\text{д}}$ ($t_{\text{н}}$ – тривалість підключення) або в момент відмови $(m + 1)$ – го елемента, коли елементи, що відмовили раніше, перебувають на відновленні в ремонтному органі.

У системах, у яких за умовами функціонування прийнято кілька обмежень на використання резервів часу (наприклад, у системах із комбінованим резервом часу, що містить поповнюваний резерв часу) $t_{\text{д}}$ і не поповнювану $t_{\text{р}}$ складові), відмова є складною подією. Виникнення цієї події залежить від характеру порушення обмежень. Зокрема, до відмови системи може призвести порушення хоча б одного будь-якого обмеження або ж усіх прийнятих обмежень разом.

На основі вищезазначеного доведено, що під час оцінювання надійності об'єктів із часовою надлишковістю необхідно враховувати не тільки факт відмови електронного комунікаційного обладнання, а й часову траєкторію функціонування об'єкта після моменту виникнення відмови. При цьому після виконання деяких умов порушення об'єктом працездатного стану може не призвести до зриву його функціонування (тобто до втрати об'єктом здатності виконувати задану функцію). Для об'єктів із поповнюваним резервом часу такою умовою є відновлення працездатності після виникнення відмови за допустимий час, тобто до витрачання резервного часу.

Тому оцінюючи надійність об'єктів із часовою надлишковістю будемо використовувати термін «ймовірність безвідмовного функціонування», а не «ймовірність безвідмовної роботи», і «ймовірність зриву функціонування» в разі відмови системи ОЧ (рис. 1). Ці терміни відображають зазначену вище особливість об'єктів із часовою надлишковістю, оскільки під час визначення показників надійності таких систем необхідно оцінювати наслідки встановлених часових обмежень до всієї траєкторії функціонування об'єкта.

У теорії та практиці надійності систем із часовою надлишковістю розрізняють поодинокі показники надійності, які характеризують одну з окремих властивостей надійності (наприклад, безвідмовність або ремонтпридатність), і комплексні показники, які характеризують одночасно кілька окремих властивостей.

Нижче наведено поодинокі показники, які використовуються для кількісної оцінки безвідмовності функціонування систем ОЧ (об'єктів із поповнюваним резервом часу). Такими показниками є ймовірність безвідмовного функціонування, ймовірність відмови (зриву функціонування), середнє напрацювання до відмови та інтенсивність відмов.

Ймовірність безвідмовного функціонування – це ймовірність того, що в межах заданого напрацювання t відмова системи ОЧ (зрив функціонування) не виникає, тобто

$$P(t, t_d) = P\{T_0(t_d) > t\} \quad (1)$$

або

$$P(t, \tau_d) = P\{T_0(\tau_d) > t\}, \quad (2)$$

де t_d, τ_d – відповідно детермінована і випадкова величина використовуваного в системі ОЧ резерву часу; $T_0(t_d), T_0(\tau_d)$ – напрацювання системи ОЧ до відмови (зриву функціонування).

Це визначення справедливе для випадку, коли на початку інтервалу часу або напрацювання об'єкт перебуває в працездатному стані, тобто здатний виконувати необхідні функції.

Ймовірність відмови (зриву функціонування) системи ОЧ є ймовірність протилежної події і визначається співвідношеннями:

$$Q(t, t_d) = 1 - P(t, t_d) = P\{T_0(t_d) \leq t\}, \quad (3)$$

$$Q(t, \tau_d) = 1 - P(t, \tau_d) = P\{T_0(\tau_d) \leq t\}. \quad (4)$$

Очевидно, що

$$P(t, t_d) + Q(t, t_d) = 1,$$

$$P(t, \tau_d) + Q(t, \tau_d) = 1.$$

Неважко бачити, що $Q(t, t_d)$ і $Q(t, \tau_d)$ це функції розподілу випадкових величин $T_0(t_d)$ і $T_0(\tau_d)$.

Середнє напрацювання системи ОЧ до відмови це математичне очікування напрацювання системи ОЧ до першої відмови:

$$\bar{T}_0(t_d) = \int_0^\infty x d_x Q(x, t_d), \quad (5)$$

$$\bar{T}_0(\tau_d) = \int_0^\infty x d_x Q(x, \tau_d). \quad (6)$$

Якщо функції $Q(t, t_d)$ і $Q(t, \tau_d)$ диференційовані за x у всьому діапазоні $(0, \infty)$, то замість формул (5) і (6) можна записати:

$$\bar{T}_0(t_d) = \int_0^\infty x f(x, t_d) dx, \quad (7)$$

$$\bar{T}_0(\tau_d) = \int_0^\infty x f(x, \tau_d) dx, \quad (8)$$

де $f(x, t_d), f(x, \tau_d)$ – щільність розподілу випадкових величин відповідно $T_0(t_d)$ і $T_0(\tau_d)$, тобто $f(x, t_d) = Q'(x, t_d)$ і $f(x, \tau_d) = Q'(x, \tau_d)$.

Інтенсивність відмов системи ОЧ це умовна щільність імовірності виникнення відмови системи ОВ, яку визначають за умови, що до розглянутого моменту відмова (зрив функціонування) не виникла.

Згідно з цим визначенням

$$\Lambda(t, t_d) = \frac{f(t, t_d)}{P(t, t_d)} = \frac{1}{1-Q(t, t_d)} \frac{dQ(t, t_d)}{dt} - \frac{1}{P(t, t_d)} \frac{dP(t, t_d)}{dt}. \quad (9)$$

Аналогічні формули справедливі й у випадку, коли резервний час – випадкова величина τ_d з функцією розподілу $D(t)$.

Як одиничні показники, що характеризують ремонтпридатність систем ОЧ, використовують функцію розподілу часу та середній час відновлення.

Час відновлення системи ОЧ T_e дорівнює перевищенню часу ремонту об'єкта t_e над резервом часу t_d за умови, що $t_e > t_d$, і має розподіл

$$\Phi_e(t, t_d) = \frac{F_e(t_d+t) - F_e(t_d)}{1 - F_e(t_d)}, \quad (10)$$

де $F_e(t)$ – функція розподілу часу відновлення об'єкта.

Використовуючи цей розподіл, можна знайти середній час відновлення системи ОЧ:

$$\bar{T}_e(t_d) = \int_{t_d}^\infty x d\Phi_e(x, t_d) = \int_{t_d}^\infty \frac{(t-t_d)dF_e(t)}{1-F_e(t_d)}. \quad (11)$$

Під час визначення наведених вище одиничних показників надійності допускали, що початковий момент часу (момент надходження завдання) збігається з переходом об'єкта в працездатний стан. Розглянемо далі випадок, коли завдання (заявки на використання об'єкта) надходять у деякий відомий або довільно обраний момент часу τ . При цьому основними показниками надійності функціонування системи ОЧ є комплексні показники: коефіцієнт готовності, коефіцієнт простою (коефіцієнт неготовності) та коефіцієнт оперативної готовності, що одночасно враховують дві окремі властивості надійності (безвідмовність та ремонтпридатність).

Коефіцієнт готовності системи ОЧ це ймовірність того, що в момент надходження завдання (розглядається стаціонарна ділянка функціонування при $\tau \rightarrow \infty$) об'єкт працездатний або ймовірність того, що заявка на використання об'єкта застане об'єкт непрацездатним, але відновлення його працездатності закінчиться до витрачання резерву часу. Цю ймовірність називають коефіцієнтом готовності за заданий час [14, 15] і в загальному випадку записують у такому вигляді:

$$K_e(t_d) = k_e + (1 - k_e)P\{\tilde{t}_e \leq \tilde{t}_e^*(t_d)\}, \quad (12)$$

де k_e – коефіцієнт готовності об'єкта;

$\tilde{t}_e$ – інтервал часу від моменту надходження завдання до моменту закінчення відновлення працездатності об'єкта;

$\tilde{t}_g^*$ – деяке гранично допустиме значення $\tilde{t}_g$, що визначається використовуваним у системі резервом часу.

Неважко бачити, що другий доданок у формулі (12) пояснюється наявністю в системі часової надлишковості та обертається в нуль, якщо резерв часу відсутній.

Коефіцієнт простою (неготовності) це ймовірність того, що заявка на використання об'єкта застане його в непрацездатному стані, і відновлення працездатності закінчиться після витрачання резерву часу, тобто

$$K_n(t_0) = 1 - K_z(t_0). \quad (13)$$

Для визначення коефіцієнта оперативної готовності може бути використана формула повної ймовірності [16]. Для об'єктів, які можуть перебувати у двох станах: у працездатному (стан «0») і в непрацездатному (стан «1») формулу для коефіцієнта оперативної готовності можна подати в такому виді:

$$P_{ог}(t, t_0) = k_z P^{(0)}(t, t_0) + (1 - k_z) P^{(1)}(t, t_0), \quad (14)$$

де k_z – коефіцієнт готовності об'єкта;

$P^{(0)}(t, t_0)$ – ймовірність безвідмовного функціонування системи протягом оперативного часу;

$(1 - k_z) P^{(1)}(t, t_0)$ – ймовірність того, що заявка на виконання завдання, яка надійшла, застане об'єкт непрацездатним, однак його відновлення закінчиться за деякий час $\theta < t_0$ і в інтервалі часу, що залишився $t - \theta$ не виникне відмова системи ОЧ.

Слід зауважити, що під час визначення комплексних показників $K_z(t_0)$, $K_n(t_0)$ і $P_{ог}(t, t_0)$ не враховуються періоди часу, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не планується, тобто в процесі функціонування об'єкт може перебувати в одному з двох станів: працездатному або непрацездатному.

Типовим прикладом апіорної невизначеності, з якою часто доводиться стикатися під час кількісної оцінки зазначених вище показників, є невизначеність у законі розподілу випадкової величини t_b – часу відновлення працездатності об'єкта. Це виражається в тому, що інформація про функцію розподілу $F_b(x) = P\{t_b < x\}$ може бути обмежена значенням тільки двох початкових моментів β_1 і β_2 .

Як було зазначено головним призначенням системи технічного обслуговування і ремонту полягає в підтримці необхідного рівня надійності об'єктів у процесі тривалої експлуатації. Вирішення цього завдання забезпечується шляхом виконання двох видів відновлювальних робіт: планових технічних обслуговувань (попереджувальних профілактик) і непланових поточних (аварійно-профілактичних) ремонтів (відновлень працездатності після відмови). Отже, в процесі технічної експлуатації об'єкт може перебувати в довільному моменті часу (у сталому режимі експлуатації за умови $\tau \rightarrow \infty$) в одному з трьох станів: працездатному, працездатному (на технічному обслуговуванні) або непрацездатному (на поточному ремонті).

Неважко бачити, що організація та якість виконання зазначених вище відновлювальних робіт суттєво впливають на рівень експлуатаційної надійності об'єктів. Тому якість технічного обслуговування і ремонту оцінюють за допомогою такого комплексного показника надійності, як коефіцієнт технічного використання, що характеризує дві окремі властивості надійності: безвідмовність і ремонтпридатність.

Безвідмовність є властивістю об'єкта виконувати необхідні функції протягом заданого інтервалу часу або напрацювання, а ремонтпридатність є властивістю об'єкта, що полягає в пристосованості до підтримання та відновлення стану, за якого він здатний виконувати необхідні функції, шляхом технічного обслуговування та ремонту.

Відповідно до ДСТУ України [11] коефіцієнт технічного використання $K_{тв}$ являє собою відношення математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані ($M[t_{\Sigma p}]$) за деякий період експлуатації до математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані та в простоях, зумовлених технічним обслуговуванням ($M[t_{\Sigma то}]$) і ремонтом ($M[t_{\Sigma р}]$), за той самий період, тобто

$$K_{тв} = \frac{M[t_{\Sigma p}]}{M[t_{\Sigma p}] + M[t_{\Sigma то}] + M[t_{\Sigma р}]}. \quad (15)$$

Іноді під час оцінювання якості технічного обслуговування та ремонту використовують показник K_n – коефіцієнт простою, що доповнюючий до одиниці коефіцієнт технічного використання, тобто

$$K_n = 1 - K_{тв}. \quad (16)$$

Значення наведених вище показників залежать від періодичності проведення технічного обслуговування T і від використовуваного в об'єктах поповнюваного резерву часу t_0 , величина якого визначає обмеження, що накладаються на тривалості обслуговування і ремонту.

Під час кількісної оцінки цих показників апіорна невизначеність проявляється в обмеженій інформації про функції розподілу напрацювання t_0 об'єкта до відмови $F(t) = P\{t_0 < t\}$, тривалості $t_{то}$ технічного обслуговування $F_{то}(t) = P\{t_{то} < t\}$ і часу $t_р$ відновлення $F_р(t) = P\{t_р < t\}$, точний вид яких

не визначений, а відомі тільки значення цих функцій у кінцевому числі точок або відомі лише деякі числові характеристики відповідних випадкових величин.

У разі тривалої експлуатації об'єктів багаторазового використання якості технічного обслуговування та ремонту доцільно оцінювати не тільки за показниками надійності (15) або (16), а й за вартісними показниками, оскільки виконання операцій обслуговування та ремонту потребують певних витрат коштів. Одним із таких вартісних показників є середні витрати, що припадають на одиницю часу перебування об'єкта в працездатному стані – середні питомі витрати $\bar{C}$, які, як і у випадку комплексного показника надійності, є функцією від періодичності обслуговування T та величини резервного часу t_0 .

Якщо процес функціонування об'єкта можна описати за допомогою регенеруючого процесу $X(t)$, то наведені вище показники мають такий вид:

$$K_{\text{тв}} = \frac{M[X^{(0)}]}{M[\tilde{X}]}, \quad (17)$$

$$\bar{C} = \frac{M[\tilde{C}]}{M[X^{(0)}]}, \quad (18)$$

де $M[\]$ – символ математичного очікування;

$X^{(0)}$ – час нормального функціонування об'єкта на періоді регенерації;

$\tilde{X}$ – тривалість періоду регенерації;

$\tilde{C}$ – витрати на обслуговування і ремонт на періоді регенерації.

Проведений аналіз показав, що оцінювання надійності технічних об'єктів проводять, як правило, в умовах апріорної невизначеності. У цих умовах результати розрахунків прийнятні тільки тоді, коли їм можна довіряти, інакше прийняті на їхній основі рішення можуть бути помилковими. Якщо надійність за результатами розрахунків виявляється низькою, значно нижчою, ніж вона буде насправді, то можливі не виправдані ускладнення конструкцій, що спричиняють здорожчання розробки, створення громіздкої і дорогої системи експлуатації, здорожчання об'єкта загалом. Якщо надійність оцінюється розрахунками дуже високо, вище, ніж вона буде насправді, то об'єкт може виявитися взагалі не придатним до застосування через велике число відмов в експлуатації. Як надмірно оптимістичні, так і надмірно песимістичні оцінки надійності неприпустимі, тому що вони можуть призвести до неефективних рішень і небажаних наслідків.

Можливі два підходи, що дають змогу уникнути завищеної (або заниженої) оцінки надійності за обмеженої (неповної) вихідної інформації.

В основі першого підходу лежать методи, що використовують сімейство параметричних розподілів і базуються на тій чи іншій інформації про закон розподілу $F(x)$. Усі відомі в теорії надійності параметричні розподіли визначаються завданням скінченного числа параметрів. Ці сімейства використовують, як правило, для апроксимації невідомої функції розподілу $F(x)$.

За відсутності необхідної інформації для вибору й обґрунтування виду закону розподілу $F(x)$ використовується другий підхід, заснований на непараметричних методах оцінки надійності. Ці методи посідають дедалі помітніше місце в задачах випробувань на надійність об'єктів та їхніх елементів, що пояснюється вихідними передумовами, які лежать в їхній основі. Вони дають змогу відмовитися від допущень щодо конкретного виду закону розподілу випадкових величин, значення яких підлягають опрацюванню для подальшого ухвалення рішення.

У цьому напрямі (під час реалізації другого підходу) є два варіанта:

а) припустити фізично виправданий напрям динаміки розвитку об'єкта (старіння, омолодження) і віднести функцію розподілу $F(x)$ до деякого класу непараметричних розподілів, наприклад, до класу розподілів, що старіють, або до класу розподілів, що молодіють;

б) не приймати взагалі будь-яких допущень щодо функції розподілу $F(x)$.

Прикладом реалізації першої можливості є введення та дослідження класу непараметричних розподілів $H(r, s)$ де r і s – будь-які числа, такі що $0 \leq r < s \leq +\infty$ [14, 17, 18]. Клас розподілів $H(r, s)$ визначено наступним чином: до нього включаються тільки ті розподіли, які $\bar{F}(t) = \exp(-\Lambda(t))$, для яких функція $\frac{\Lambda(t)}{t^r}$ є зростаючою, а функція $\frac{\Lambda(t)}{t^s}$ – спадаючою, де $\Lambda(t)$ – функція виробленого ресурсу на інтервалі часу $[0, t]$:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(x) dx. \quad (19)$$

Таким чином, клас непараметричних розподілів $H(r, s)$ складається з тих розподілів, для яких функція ресурсу $\Lambda(t)$ має степеневий порядок зростання з граничними значеннями параметрів r і s . До числа таких класів розподілів, зокрема, можна віднести такі:

$H(1, +\infty)$ – клас усіх розподілів, що старіють у середньому;

$H(r, s)$, $1 \leq r < s$ – підклас усіх розподілів, що старіють у середньому, зростання яких обмежене значеннями параметрів r і s ; інтенсивності відмови для функцій із цього підкласу є зростаючими.

$H(0, 1)$ – клас усіх молодіжних у середньому розподілів;

$H(r, s)$, $r < s \leq 1$ – підклас усіх розподілів, що молодіють у середньому, швидкість убавання яких обмежена значеннями параметрів r і s ; інтенсивності відмови для функцій із цього підкласу є спадними.

Функції класу $H(r, s)$ при $r \leq 1 \leq s$ такі, що відповідні інтенсивності відмови можуть бути монотонними. Зауважимо, що функції цього класу є більш популярними в теорії надійності, коли в процесі експлуатації об'єкта є інтервали приробітку та старіння. Очевидно, що для вкладених інтервалів $[r; s]$ класи розподілу $H(r, s)$ також є вкладеними, тобто $H(r_1, s_1) \subset H(r_2, s_2)$, якщо $r_2 \leq r_1 \leq s_1 \leq s_2$.

В [14] наведено приклади непараметричних розподілів із класів за різних значень параметрів r і s та розглянуто властивості цих розподілів, а також результати використання цього підходу для граничної оцінки надійності систем в умовах неповної інформації про закони розподілу напрацювання до відмови елементів. Основні недоліки цього напрямку дослідження надійності:

- необхідно знати статистичні дані про закони розподілу напрацювання до відмови елементів об'єктів;

- отримання параметрів r і s за статистичними даними потребує додаткового вивчення;
 - теорія інтервальних оцінок надійності систем не доведена до інженерних методик;
 - діапазон одержуваних оцінок показників надійності в низці випадків занадто великий;
- для інженера-практика може виявитися складним використовуваний математичний апарат.

Друга з можливостей реалізації непараметричних методів для оцінювання надійності в умовах апіорної невизначеності ґрунтується на тому, що відносно функції розподілу $F(x)$ не приймається взагалі будь-яких допущень. Цей шлях доцільно використовувати в тих випадках, коли з багатьох причин немає достатніх підстав навіть для того, щоб віднести досліджуваний об'єкт до типу тих, хто старіє, або тих, хто молодіє. Можна лише допустити, що відомо тільки значення функції розподілу $F(x)$ в окремих точках або кілька її початкових моментів і ніяка інша інформація про функцію розподілу невідома.

Висновки

В умовах постійної невизначеності та ризиків виникнення збоїв та стійких відмов, підвищення надійності електронного комунікаційного обладнання є критично важливим для забезпечення стійкого зв'язку та інформаційного обміну. Використання часового резервування є ефективним підходом до підвищення надійності електронних комунікаційних систем. Цей підхід дозволяє враховувати можливість виникнення збоїв та стійких відмов, що не призводять до негайного зриву функціонування системи.

Для оцінювання показників надійності систем з часовим резервуванням доцільно використовувати як поодинокі, так і комплексні показники.

Комплексний показник, такий як коефіцієнт оперативної готовності, дозволяє оцінити ефективність роботи системи з урахуванням часових резервів і процесу відновлення працездатності. Якість технічного обслуговування та ремонту має вирішальне значення для забезпечення високої надійності електронних комунікаційних систем. Ефективність цих заходів може бути оцінена за допомогою коефіцієнта технічного використання.

Розроблені в ході дослідження методи та підходи можуть бути використані для підвищення надійності електронних комунікаційних систем, що сприятиме покращенню якості зв'язку та інформаційного обміну.

Результати дослідження мають практичну цінність для інженерів та технічних фахівців, які займаються модернізацією існуючого та створенням нового електронного комунікаційного обладнання.

Таким чином, дослідження сприяє розвитку методів та підходів до забезпечення безперебійної роботи електронних комунікаційних систем, що є важливим для сучасного суспільства.

Література

1. Littlewood B. Modelling the effects of combining diverse software fault removal techniques [Electronic resource] / B. Littlewood, P. Popov, L. Strigini // IEEE Trans. on Software Engineering. – 2000. – № 26 (12). P. 1157–1167. – Mode of access: DOI: 10.1109/32.888629.
2. Kim Y. A Software Reliability Model with Dependent Failure and Optimal Release Time [Electronic resource] / Y. Kim, K. Song, H. Pham, I. Chang // Symmetry. – 2022. – № 14. – P. 343. – Mode of access: DOI: 10.3390/sym14020343.
3. Zhong W. Reliability Evaluation and Improvement of Islanded Microgrid Considering Operation Failures of Power Electronic Equipment [Electronic resource] / W. Zhong, L. Wang, Z. Liu, S. Hou // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2020. – № 8 (1). – P. 111 – 123. DOI: 10.35833/MPCE/2018.000666.
4. Основи теорії надійності, контролю та діагностування засобів вимірювальної техніки: навчальний посібник / [Ю.П. Белокурський та ін.] – Харків: ХНУРЕ, 2011. 174 с.
5. Єременко О.С. Підвищення відмовостійкості елементів сучасних інфокомунікаційних мереж

із застосуванням протоколів резервування шлюзу за замовчуванням [Електронний ресурс] / О.С. Єременко, А. Мерсні // Проблеми телекомунікацій. – 2020. – № 2(27). – С. 68–81. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30837/pt.2020.2.06>.

6. Князева Н. Оцінка структурної надійності телекомунікаційних мереж невизначеної топології на основі імітаційного моделювання [Електронний ресурс] / Н. Князева, О. Ненов // Вісник Університету “Україна” Серія Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. – 2021. – № 2(23). – Режим доступу: <https://visn-it.uu.edu.ua/index.php/visnicct/article/view/54> (дата звернення: 10.12.2024).

7. Pavlov N. Some Transmuted Software Reliability Models [Electronic resource] / N. Pavlov // Journal of Mathematical Sciences and Modelling. – 2019. – Vol. 2, No. 1. P. 64 – 70. Mode of access: DOI: <https://doi.org/10.33187/jmsm.434277>.

8. Кустов В.Ф. Основы теории надёжности та функциональной безопасности систем: навчальний посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. 218 с.

9. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: монографія / [Б.П. Креденцер та ін.]. – Київ: Фенікс, 2013. – 342с.

10. Yakovyna V.S. Sambir Algorithms and software suite for reliability assessment of complex technical systems [Electronic resource] / V.S. Yakovyna, M.M. Seniv, I.I. Symets // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2020. – Vol. 4. – P. 163–177. – Mode of access: <https://www.doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-16>. (дата звернення: 10.12.2024).

11. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. [Чинний від 1997-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1995. – 39 с.

12. Haque M. A. Key Issues in Software Reliability Growth Models [Electronic resource] / M.A. Haque, N.O. Ahmed // Recent Advances in Computer Science and Communications. – 2020. – Vol. 13. – Mode of access: <https://doi.org/10.2174/2666255813999201012182821>.

13. Raghuvanshi K., Agarwal A., Jain K. A time-variant fault detection software reliability model [Electronic resource] / K. Raghuvanshi, A. Agarwal, K. Jain // SN Appl. Sci. – 2021. – № 3 (18). Mode of access: <https://www.doi.org/10.1007/s42452-020-04015-z>.

14. Креденцер Б.П. Розрахунок показників надійності технічних систем з надлишковістю: монографія. – Київ: Фенікс, 2019. 520 с.

15. Ahmed N.O. From Byzantine Fault-Tolerance to Fault-Avoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency. [Electronic resource] / N.O. Ahmed, B. Bhargava // IEEE Transactions on Cloud Computing. – 2020. – № 8 (3). – P. 847 – 860. – Mode of access: DOI:10.1109/TCC.2018.2814989..

16. Mogylevych D. Comprehensive Reliability Assessment Technique of Telecommunication Networks Equipment with Reducible Structure [Electronic resource] / D. Mogylevych, I. Kononova, B. Kredentser, I. Karadschow // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Радіотехніка. – 2020. – № 80. – С. 39–47. Mode of access: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.39-47>.

17. Ліхузова Т.А. Теорія імовірностей та математична статистика: підручник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 341 с.

18. Основы надёжности та диагностики информационных систем: навчальний посібник / [Гніденко М.П. та ін.] – Київ: ДУТ, 2020. 184 с.

References

1. Littlewood B. Modelling the effects of combining diverse software fault removal techniques [Electronic resource] / B. Littlewood, P. Popov, L. Strigini // IEEE Trans. on Software Engineering. – 2000. – № 26 (12). P. 1157–1167. – Mode of access: DOI: 10.1109/32.888629.

2. Kim Y. A Software Reliability Model with Dependent Failure and Optimal Release Time [Electronic resource] / Y. Kim, K. Song, H. Pham, I. Chang // Symmetry. – 2022. – № 14. – P. 343. – Mode of access: DOI: 10.3390/sym14020343.

3. Zhong W. Reliability Evaluation and Improvement of Islanded Microgrid Considering Operation Failures of Power Electronic Equipment [Electronic resource] / W. Zhong, L. Wang, Z. Liu, S. Hou // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2020. – № 8 (1). – P. 111 – 123. DOI: 10.35833/MPCE/2018.000666.

4. Osnovy teorii nadiinosti, kontroliu ta diahnostuvannia zasobiv vymiriuvanoi tekhniki: navchalnyi posibnyk / [Yu.P. Belokurskiy ta in.] – Kharkiv: KhNURE, 2011. 174 s.

5. Yeremenko O.S. Pidvyshchennia vidmovostiosti elementiv suchasnykh infokomunikatsiynykh merezh iz zastosuvanniam protokoliv rezervuvannia shliuzu za zamovchuvanniam [Elektronnyi resurs] / O.S. Yeremenko, A. Mersni // Problemy telekomunikatsii. – 2020. – № 2(27). – С. 68–81. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.30837/pt.2020.2.06>.

6. Kniazieva N. Otsinka strukturalnoi nadiinosti telekomunikatsiynykh merezh nevyznachenoї topologii na osnovi imitatsiinoho modeliuвання [Elektronnyi resurs] / N. Kniazieva, O. Nienov // Visnyk Universytetu “Ukraina” Seriya Informatyka, obchysliuvalna tekhnika ta kibernetika. – 2021. – № 2(23). – Rezhym dostupu: <https://visn-it.uu.edu.ua/index.php/visnicct/article/view/54> (data zvernennia: 10.12.2024).

7. Pavlov N. Some Transmuted Software Reliability Models [Electronic resource] / N. Pavlov // Journal of Mathematical Sciences and Modelling. – 2019. – Vol. 2, No. 1. P. 64 – 70. Mode of access: DOI: <https://doi.org/10.33187/jmsm.434277>.

8. Kustov V.F. Osnovy teorii nadiinosti ta funktsiinoї bezpechnosti system: navchalnyi posibnyk. – Kharkiv: UkrDAZT, 2008. 218 s.

9. Nadiinist system z nadlyshkovistiu: metody, modeli, optymizatsiia: monohrafiia / [B.P. Kredentser ta in.]. – Kyiv: Feniks, 2013. – 342s.

10. Yakovyna V.S. Sambir Algorithms and software suite for reliability assessment of complex technical systems [Electronic resource] / V.S. Yakovyna, M.M. Seniv, I.I. Symets // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2020. – Vol. 4. – P. 163–177. – Mode of access: <https://www.doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-16>. (дата звернення: 10.12.2024).

11. DSTU 2862-94. Nadiinist tekhniky. Metody rozrakhunku pokaznykiv nadiinosti. [Chynnyi vid 1997-01- 01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 1995. – 39 s.
12. Haque M. A. Key Issues in Software Reliability Growth Models [Electronic resource] / M.A. Haque, N.O. Ahmed // Recent Advances in Computer Science and Communications. – 2020. – Vol. 13. – Mode of access: <https://doi.org/10.2174/2666255813999201012182821>.
13. Raghuvanshi K., Agarwal A., Jain K. A time-variant fault detection software reliability model [Electronic resource] / K. Raghuvanshi, A. Agarwal, K. Jain // SN Appl. Sci. – 2021. – № 3 (18). Mode of access: <https://www.doi.org/10.1007/s42452-020-04015-z>.
14. Kredentser B.P. Rozrakhunok pokaznykiv nadiinosti tekhnichnykh system z nadlyshkovistiu: monohrafiia. –Kyiv: Feniks, 2019. 520 s.
15. Ahmed N.O. From Byzantine Fault-Tolerance to Fault-Avoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency. [Electronic resource] / N.O. Ahmed, B. Bhargava // IEEE Transactions on Cloud Computing. – 2020. – № 8 (3). – P. 847 – 860. – Mode of access: DOI:10.1109/TCC.2018.2814989.
16. Mogylevych D. Comprehensive Reliability Assessment Technique of Telecommunication Networks Equipment with Reducible Structure [Electronic resource] / D. Mogylevych, I. Kononova, B.Kredentser, I. Karadschow // Visnyk NTUU "KPI". Seriia Radiotekhnika. – 2020. – № 80. – C. 39–47. Mode of access: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.39-47>.
17. Likhousova T.A. Teoriia imovirnostei ta matematychna statystyka: pidruchnyk. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2018. 341 s.
18. Osnovy nadiinosti ta diahnozyky informatsiinykh system: navchalnyi posibnyk / [Hnidenko M.P. ta in.] – Kyiv: DUT, 2020. 184 s.