

DOI: 10.18372/2310-5461.41.13258

УДК 004.7:519.87 (045)

В. В. Уланський, д-р. тех. наук, проф.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-0794-0217
e-mail: vulanskyi@yahoo.com;

І. Є. Терентьєва, канд. техн. наук
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-0391-5041
e-mail: i_terentyeva@nau.edu.ua

І. О. Мачалін, д-р техн. наук, проф.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-1684-4980
e-mail: tks@nau.edu.ua;

ОЦІНКА ГОТОВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ З РІЗНИМИ ВИДАМИ ВІДМОВ

Вступ

Особливістю сучасних телекомунікаційних систем є їх безперервна експлуатація. Користувач мережі має отримати якісний зв'язок та доступ до інформації у будь-який довільний момент часу. Це зумовлює необхідність мати високу готовність таких систем, яка чисельно визначається коефіцієнтом готовності. Виявлення відмов під час експлуатації обладнання таких систем, охоплене неперервним апаратним та програмним тестуванням. Проведений аналіз показав, що за характером усунення основними типами відмов телекомунікаційних систем є сталі та повторювальні відмови.

Аналіз публікацій та формулювання мети дослідження

За останні десятиріччя розробленню математичних моделей для оцінки надійності та готовності сучасних цифрових систем з різними типами відмов приділяло увагу багато дослідників.

Так, у праці [1] розроблено аналітичну модель для аналізу надійності мережі UMTS з використанням ланцюгів Маркова та напівмарковського процесу з експоненціальним розподілом випадкових величин. Проте в цій моделі не розглядаються повторювальні відмови. У працях [2; 3] розглядаються марковські моделі з трьома станами для аналізу надійності цифрових систем, яким властиві як стійкі, так і повторювальні відмови. Модель технічного обслуговування одноклокової системи, якій властиві явні та приховані відмови, з періодичним тестуванням розроблено в праці [4] при довільному розподілі напрацювання до відмови. Однак модель не враховує повторювальні відмови. У праці [5] розглядається модель надійності системи із стійкими та повторю-

вальними відмовами. Періодичні тестування виконуються для виявлення несправностей. У моделі передбачається, що обидва типи відмов мають експоненціальний розподіл напрацювання до відмови. У праці [6] розроблено математичну модель системи зв'язку з повторювальними відмовами. Ці відмови мають прихований характер та експоненціальний розподіл напрацювання до відмови. Зроблено припущення, що через певний проміжок часу прихована відмова стає явною. У праці [7] представлено марковську модель для системи, яка періодично тестується та піддається повторювальним відмовам. Модель дозволяє мінімізувати витрати на тестування. У праці [8] оцінюється вплив повторювальних відмов на вартість обслуговування цифрової авіоніки. Проте запропонована модель не може бути використана для телекомунікаційних систем через відмінності в режимі роботи літаків і телекомунікаційних систем. У праці [9] узагальнено можливі причини і наслідки повторювальних відмов в електронних пристроях. Також досліджуються деякі повторювальні відмови електронних друкованих плат. У праці [10] представлено математичну модель цифрової електронної системи з явними, прихованими та повторювальними відмовами, яка неперервно тестується, для оцінки готовності системи.

Постановка проблеми

Аналіз попередніх досліджень показав, що математичні моделі для оцінки готовності цифрових систем з різними типами відмов розроблені тільки для випадку періодичного тестування, і всі моделі базуються на марковському або напівмарковському процесі.

Таким чином, **метою** даного дослідження є розроблення математичної моделі для оцінки готовності телекомунікаційної системи з різними

типами відмов із урахуванням особливостей її експлуатації та процесу технічного обслуговування.

Математична модель процесу технічного обслуговування телекомунікаційної системи з різними типами відмов

Для розроблення математичної моделі процесу технічного обслуговування (ТО) телекомунікаційної системи використовується випадковий регенеруючий процес [11] $Q(t)$ з кінцевим числом станів.

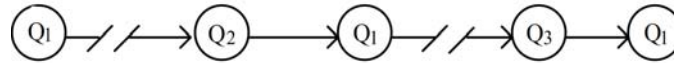


Рис. 1. Діаграма реалізації випадкового регенеруючого процесу $Q(t)$

Система може знаходитися в одному з наступних станів у будь-який довільний час t :

- $Q(t) = Q_1$, якщо в момент часу t система перебуває в працездатному стані;
- $Q(t) = Q_2$, якщо в момент часу t система не використовується, оскільки вона ремонтується після виникнення повторювальної відмови;
- $Q(t) = Q_3$, якщо в момент часу t система не використовується, оскільки вона ремонтується після виникнення стійкої відмови.

Готовність телекомунікаційної системи чисельно оцінюють коефіцієнтом готовності.

Для його розрахунку визначимо середній час знаходження системи в станах працездатності та відновлення для випадку довільного закону розподілу напрацювання до відмови.

Визначення середнього часу знаходження системи в працездатному стані

Нехай у момент часу γ ($0 < \gamma \leq \infty$) відбудеться стійка відмова. Тоді, згідно з прийнятим обмеженням, система буде перебувати в працездатному стані

Можливу реалізацію регенеруючого процесу $Q(t)$ показано на рис. 1.

Для побудови моделі прийнято такі припущення:

- у будь-який час може виникнути лише один тип відмови; відмова виявляється негайно шляхом неперервного тестування;
- після проведення ремонту система вважається повністю відновленою;
- кількість запасних частин необмежена, а часом заміни можна знехтувати.

в одному з двох можливих випадків. У першому випадку вона буде працювати до настання стійкої відмови в момент часу γ ($0 < \gamma \leq \infty$), як показано на рис. 2, а.

У другому випадку система буде працювати до настання повторювальної відмови в момент часу η ($\eta < \gamma$), як показано на рис. 2, б.

Тоді середній час знаходження системи в працездатному стані можна визначити за формулою повного математичного сподівання (МС) неперервної випадкової величини:

$$M[T_1] = \int_0^\infty \{M[T_1^\gamma | \Gamma = \gamma] + M[T_1^\eta | \Gamma = \gamma]\} d\Phi(t), \quad (1)$$

де Γ ($\Gamma \geq 0$) — випадкова величина, яка характеризує напрацювання до стійкої відмови; $M[T_1^\gamma | \Gamma = \gamma]$ — умовне МС випадкового напрацювання до стійкої відмови за умови, що $\Gamma = \gamma$; $M[T_1^\eta | \Gamma = \gamma]$ — умовне МС випадкового напрацювання до повторювальної відмови за умови, що $\Gamma = \gamma$; $\Phi(t)$ — функція розподілу (ФР) напрацювання до стійкої відмови.

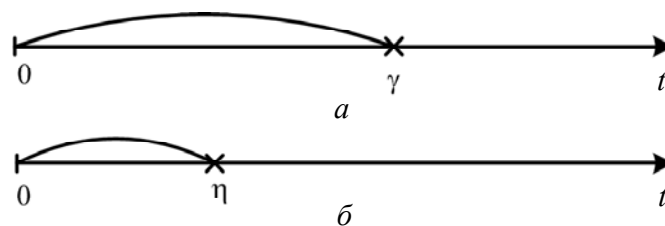


Рис. 2. Часові діаграми процесу ТО при настанні сталої відмови (а) та повторювальної відмови (б)

Використовуючи часові діаграми, які показані на рис. 2, визначаємо вирази для умовних МС:

$$M[T_1^\gamma | \Gamma = \gamma \cap H > \gamma] = \gamma, \quad (2)$$

$$M[T_1^\eta | \Gamma = \gamma \cap H = \eta < \gamma] = \eta, \quad (3)$$

де H ($H \geq 0$) — випадкова величина, яка характеризує напрацювання до повторювальної відмови.

Умова $H > \gamma$ у виразі (2) показує, що до моменту часу $\Gamma = \gamma$ настання стійкої відмови повторювальна відмова не виникне із імовірністю $P(H > \gamma) = 1 - \Psi(\gamma)$, тому отримуємо

$$M[T_1^\gamma | \Gamma = \gamma] = \gamma [1 - \Psi(\gamma)], \quad (4)$$

де $\Psi(\gamma)$ — ФР напрацювання до повторювальної відмови.

За аналогією, умова $H = \eta < \gamma$ у виразі (3) показує, що до моменту часу $H = \eta$ настання повторювальної відмови стійка відмова не виникне, тому

$$M[T_1^\eta | \Gamma = \gamma] = \int_0^\gamma x d\Psi(x). \quad (5)$$

Підставляючи формули (4) і (5) у вираз (1), отримуємо

$$M[T_1] = \int_0^\infty \left\{ \int_0^\eta x d\Psi(x) + \eta [1 - \Psi(\eta)] \right\} d\Phi(\eta). \quad (6)$$

Визначення середнього часу знаходження системи в стані відновлення через повторювальну відмову

Нехай в момент часу η відбудеться повторювальна відмова за умови $\Gamma > \eta$. Тоді будуть виконуватися операції з відновлення системи упродовж середнього часу $t_{пв}$, як показано на рис. 3. Після відновлення система перейде в стан працездатності і буде використовуватися за призначенням.

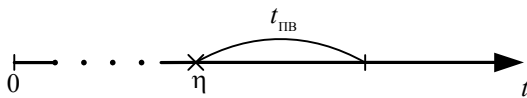


Рис. 3. Часова діаграма процесу ТО під час знаходження системи в стані відновлення через повторювальну відмову

Нехай на інтервалі часу від η до $\eta + d\eta$ ($0 < \eta < \infty$) відбудеться повторювальна відмова, тоді умовна ймовірність цієї випадкової події буде дорівнювати елементу ймовірності $\psi(\eta)d\eta$ за умови, що до моменту часу η не було стійкої відмови, тобто

$$P\{\eta < H \leq \eta + d\eta | \Gamma > \eta\} = \psi(\eta)d\eta. \quad (7)$$

Безумовна ймовірність повторювальної відмови на інтервалі $(\eta, \eta + d\eta)$ буде дорівнювати

$$P\{\eta < H \leq \eta + d\eta\} = [1 - \Phi(\eta)]\psi(\eta)d\eta, \quad (8)$$

де $\psi(\eta)$ — щільність розподілу ймовірностей напрацювання до повторювальної відмови.

Ймовірність повторювальної відмови на інтервалі $(0, \infty)$ визначається інтегруванням виразу (8) по області існування випадкової величини H , тобто

$$P\{0 < H \leq \infty\} = \int_0^\infty [1 - \Phi(x)]\psi(x)dx. \quad (9)$$

Середній час знаходження системи в стані відновлення через повторювальну відмову

визначається множенням середньої тривалості відновлення $t_{пв}$ на ймовірність (9):

$$M[T_2] = t_{пв} P\{0 < H \leq \infty\} = t_{пв} \int_0^\infty [1 - \Phi(x)]\psi(x)dx. \quad (10)$$

Визначення середнього часу знаходження системи в стані відновлення через стійку відмову

Нехай в момент часу γ відбудеться стійка відмова за умови $H > \gamma$. Тоді будуть виконуватися операції з відновлення системи упродовж середнього часу $t_{св}$, як показано на рис. 4. Після відновлення система перейде в стан працездатності і буде використовуватися за призначенням.

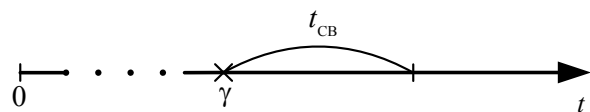


Рис. 4. Часова діаграма процесу ТО під час знаходження системи в стані відновлення через стійку відмову

Припустимо, що на інтервалі часу від γ до $\gamma + d\gamma$ ($0 < \gamma < \infty$) відбудеться стійка відмова, тоді умовна ймовірність цієї випадкової події буде дорівнювати елементу ймовірності $\phi(\gamma)d\gamma$ за умови, що до моменту γ не було повторювальної відмови, тобто

$$P\{\gamma < \Gamma \leq \gamma + d\gamma | H > \gamma\} = \phi(\gamma)d\gamma, \quad (11)$$

де $\phi(\gamma)$ — щільність розподілу ймовірностей напрацювання до стійкої відмови.

Безумовна ймовірність стійкої відмови на інтервалі $(\gamma, \gamma + d\gamma)$ буде рівною

$$P\{\gamma < \Gamma \leq \gamma + d\gamma\} = [1 - \Psi(\gamma)]\phi(\gamma)d\gamma. \quad (12)$$

Середній час знаходження ЗМ в стані відновлення через стійку відмову визначається за формулою повного МС неперервної випадкової величини.

Ймовірність стійкої відмови на інтервалі $(0, \infty)$ визначається інтегруванням виразу (12) по області існування випадкової величини Γ , тобто

$$P\{0 < \Gamma \leq \infty\} = \int_0^\infty [1 - \Psi(u)]\phi(u)du. \quad (13)$$

Середній час знаходження системи в стані відновлення через стійку відмову визначається за формулою

$$M[T_3] = t_{св} P\{0 < \Gamma \leq \infty\} = t_{св} \int_0^\infty [1 - \Psi(u)]\phi(u)du. \quad (14)$$

Таким чином, отримано математичні вирази, які визначають середній час знаходження

системи в станах працездатності та відновлення. Коефіцієнт готовності системи розраховується за формулою:

$$K = \frac{M[T_1]}{\sum_{i=1}^3 M[T_i]} \quad (15)$$

Визначення коефіцієнта готовності одномодульної системи для випадку експоненціального закону розподілу напрацювання до відмови

Як приклад розрахуємо коефіцієнт готовності мікропроцесора контролера радіомережі Nokia (RNC).

Оскільки основною функцією RNC є контроль і управління мережею радіодоступу (RAN) і радіоканалів, а архітектура RNC реалізована за допомогою багатопроцесорної системи [12], готовність RNC більшою мірою визначається готовністю саме мікропроцесорів комп'ютерних блоків.

Позначимо інтенсивність стійких відмов μ , інтенсивність повторювальних відмов θ , а час відновлення буде дорівнювати $t_{ПВ} = t_{СВ} = 1$ год.

Середній час знаходження мікропроцесора у станах працездатності та відновлення для випадку експоненціального закону розподілу напрацювання до відмови визначається підстановкою ФР напрацювання до відмови $\Phi(t) = 1 - \exp(-\mu t)$ та $\Psi(t) = 1 - \exp(-\theta t)$ і щільностей розподілу ймовірностей напрацювання до відмови $\phi(t) = \mu \exp(-\mu t)$ та $\psi(t) = \theta \exp(-\theta t)$ у формули (6), (10) та (14) відповідно:

$$M[T_1] = \frac{1}{\mu + \theta}, \quad (16)$$

$$M[T_2] = \frac{t_{ПВ} \theta}{\mu + \theta}, \quad (17)$$

$$M[T_3] = \frac{t_{СВ} \mu}{\mu + \theta}. \quad (18)$$

Коефіцієнт готовності мікропроцесора розраховується підстановкою виразів (16)–(18) у вираз (15):

$$K = \frac{1}{1 + t_{СВ} \theta + t_{ПВ} \mu}. \quad (19)$$

Графік залежності середнього часу, проведеного мікропроцесором в стані працездатності, як функція повторювальних відмов, показано на рис. 5.

Як видно із форми графіка, час знаходження мікропроцесора в працездатному стані істотно залежить від інтенсивності повторювальних відмов.

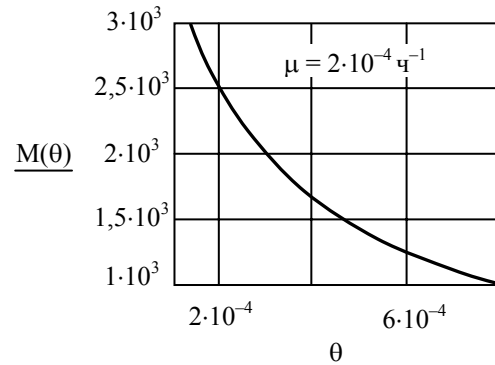


Рис. 5. Графік залежності середнього часу перебування мікропроцесора у працездатному стані від інтенсивності повторювальних відмов при $\mu = 0,0002 \text{ ч}^{-1}$

Висновки

Розроблено математичну модель процесу ТО телекомунікаційної системи з різними типами відмов. Отримано вирази для розрахунку середнього часу перебування системи в станах працездатності та відновлення для довільного та експоненціального розподілів напрацювання до відмови, що дозволило оцінити готовність системи. Отримані результати можуть бути використані як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації телекомунікаційних систем.

У майбутньому дослідженні планується розроблення моделі процесу ТО телекомунікаційної системи на кінцевому інтервалі часу її експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dharmaraja S., Jindal V. and Varshney U., "Reliability and survivability analysis for UMTS network: an analytical approach". *Network and service management. IEEE transactions.* vol. 5. Pp. 132–142. 2008.
2. Prasad V. B. "Computer networks reliability evaluations and intermittent faults". *Proc. of 1990 IEEE 33th Midwest Symp on Circuits and Systems.* vol. 1 Calgary. Alta. 1990. Pp. 327–330.
3. Prasad V. B. "Digital systems with intermittent faults and Markovian models". *Proc. of 1992 IEEE 35th Midwest Symp on Circuits and Systems.* vol. 1. Washington. 1992. Pp. 195–198.
4. Уланський В. В., Мачалин И. А. Стратегия технического обслуживания одноплодной системы с явными и скрытыми отказами. *Математические машины и системы.* Т. 3/4. Киев. 2007. С. 245–256.
5. Nakagava T. Maintenance theory of reliability. London: Springer. 2005. 269 p.
6. Nakagava T. Advanced reliability models and maintenance policies. London: Springer. 2008. 234 p.
7. Kranitis N., Merentitis A., and Laoutaris N. Optimal periodic testing of intermittent faults in embedded pipeline processor applications. *Proc. of*

2006 IEEE Design, Automation and Test in Europe Conf. Munich, Germany, 2006. Pp. 1–6.

8. **Raza A.** and **Ulansky V.** Assessing the impact of intermittent failures on the cost of digital avionics' maintenance. *Proc. of the 2016 IEEE Aerospace Conf. Big Sky*. Montana, March 5–12, 2016. Pp. 1–16.

9. **Qi H.**, **Ganesan S.** and **Pecht M.** No-fault-found and intermittent failures in electronic products. *Micro-electronics Reliability*. vol. 48. 2008. Pp. 663–674.

10. **Ulansky V.** and **Terentyeva I.** Availability modeling of a digital electronic system with intermittent failures and continuous testing. *Engineering Letters*. 2017. V. 25. № 2. P. 104–111.

11. **Smith W. L.** Regenerative stochastic processes. *Proc. of the Royal Society. London. Series A. Mathematical. Physical and Engineering Sciences* 232. London. Pp. 6–31. 1955.

12. RNC2_X Product Description/<https://nokia.com>

Уланський В. В., Терентьєва І. Є., Мачалін І. О.

ОЦІНКА ГОТОВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ З РІЗНИМИ ВИДАМИ ВІДМОВ

У статті розглянуто телекомунікаційні системи з різними типами відмов, особливості їх експлуатації і процесу технічного обслуговування. Розроблено математичну модель процесу технічного обслуговування телекомунікаційної системи із стійкими та повторювальними відмовами, охоплену неперервним тестуванням. Отримано математичні вирази для обчислення середнього часу знаходження системи в робочому стані, станах відновлення та коефіцієнта готовності з використанням властивостей випадкового регенеруючого процесу при довільному законі розподілу напрацювання системи до відмови на нескінченному інтервалі часу. Пропоновані аналітичні вирази можуть бути використані для будь-яких законів розподілу напрацювання до стійких і повторювальних відмов. Можна також використовувати ці результати для композиції розподілів напрацювання до відмови системи. Така композиція може включати в себе розподіли, пов'язані з поступовими і раптовими відмовами. Наведено числовий приклад розрахунку середнього часу знаходження одномодульної системи в робочому стані, станах відновлення та коефіцієнта готовності при експоненціальному законі розподілу напрацювання системи до відмови із урахуванням інтенсивності стійких та повторювальних відмов. Показано, що збільшення інтенсивності повторювальних відмов істотно впливає на час перебування системи в працездатному стані, а саме зменшує його.

Ключові слова: технічне обслуговування; коефіцієнт готовності; надійність телекомунікаційної системи; стійка відмова; повторювальна відмова; неперервне тестування; регенеруючий процес; математична модель; моделювання; моніторинг; оцінка; діагностика.

Ulansky V., Terentyeva I., Machalin I.

EVALUATION OF AVAILABILITY OF A TELECOMMUNICATION SYSTEM WITH DIFFERENT TYPES OF FAILURES

The article considers the operation and maintenance of a telecommunication system with different types of failures. A mathematical model of a telecommunication system, which is continuously tested during operation, subject to permanent and intermittent failures is developed. Mathematical equations are derived to calculate the mean times spent by the system in the operable and repair states due to the permanent and intermittent failures, and system availability using the properties of the regenerative process under arbitrary failure distributions on the infinite time horizon. The proposed analytical expressions can be used for any laws of the distribution of operating time to permanent and intermittent failures. It is also possible to use these results for the composition of distributions of time to system failure. Such composition may include the distributions related to gradual and sudden failures. A numerical example is given for calculating the mean times spent by the one-module telecommunication system in the operable and repair states, and system availability under exponential failure distributions considering permanent and intermittent failure rates. Provided calculations demonstrate that increasing the intermittent failure rate reduces the mean time spent by the system in the operable state. The obtained results allow more precisely evaluate the availability and reliability of a telecommunication system with different types of failures and can be used during the design, operation and maintenance stages of a telecommunication system.

Keywords: operation and maintenance; availability; reliability of the telecommunication system; permanent failure; intermittent failure; continuous testing; regenerative process; mathematical model; modeling; monitoring; evaluation; diagnostics.

Уланский В. В., Терентьева И. Е., Мачалин И. А.

ОЦЕНКА ГОТОВНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ОТКАЗОВ

В статье рассмотрены телекоммуникационные системы с различными типами отказов, особенности их эксплуатации и процесса технического обслуживания. Разработана математическая модель процесса технического обслуживания телекоммуникационной системы с устойчивыми и перемежающимися отказами, охваченной непрерывным тестированием. Получены математические выражения для расчета среднего

времени нахождения системы в рабочем состоянии, состояниях восстановления и коэффициента готовности с использованием свойств случайного регенерирующего процесса при произвольном законе распределения наработки системы до отказа на бесконечном интервале времени. Предлагаемые аналитические выражения могут быть использованы для любых законов распределения наработки до устойчивых и перемежающихся отказов. Можно также использовать эти результаты для композиции распределений наработки до отказа системы. Такая композиция может включать в себя распределения, связанные с постепенными и внезапными отказами. Приведен числовой пример расчета среднего времени нахождения одномодульной системы в рабочем состоянии, состояниях восстановления и коэффициента готовности при экспоненциальном законе распределения наработки системы до отказа с учетом интенсивности устойчивых и перемежающихся отказов. Показано, что увеличение интенсивности перемежающихся отказов существенно влияет на время пребывания системы в работоспособном состоянии, а именно уменьшает его.

Ключевые слова: техническое обслуживание; коэффициент готовности; надежность телекоммуникационной системы; устойчивый отказ; перемежающийся отказ; непрерывное тестирование; регенерирующий процесс; математическая модель; моделирование; мониторинг; оценка; диагностика.

Стаття надійшла до редакції 17.01.2019 р.

Прийнято до друку 26.02.2019 р.