

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний авіаційний університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТЕРЕНТЬЄВА ІРИНА ЄВГЕНІВНА

УДК 654.16:621.396.6 (043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ І МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГОТОВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ
СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ**

05.12.17 – «Радіотехнічні і телевізійні системи»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

І.Є. Терентьєва

Науковий керівник Уланський Володимир Васильович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Терентьєва І.Є. Методи і моделі забезпечення готовності обладнання систем радіозв'язку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.17 «Радіотехнічні та телевізійні системи». – Національний авіаційний університет, Київ, 2017.

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, яка має важливе наукове і практичне значення та полягає в розробленні математичних моделей процесу технічного обслуговування (ТО) обладнання систем радіозв'язку (СРЗ) для оцінювання готовності обладнання СРЗ та методів, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації систем за рахунок зниження експлуатаційних витрат при підтримці належного рівня їхньої готовності.

У процесі виконання дисертаційної роботи проведено аналіз відомих математичних моделей процесу ТО СРЗ і техніко-економічних показників оцінювання ефективності експлуатації обладнання СРЗ. Обґрунтовано необхідність у розробленні математичних моделей процесу ТО обладнання СРЗ і вдосконаленні методу оцінювання повних експлуатаційних витрат, який повинен враховувати особливості процесу безперервного контролю технічного стану обладнання СРЗ, повноту контролю працездатності, а також вплив явних, прихованих і повторювальних відмов.

В дисертаційній роботі отримано такі основні результати, які мають наукову новизну:

1. Уперше розроблено математичні моделі процесу ТО нерезервованого обладнання СРЗ, яке охоплене безперервним контролем працездатності, на нескінченному інтервалі експлуатації, які, на відміну від відомих, одночасно враховують вплив явних, прихованих і повторювальних відмов, а також повноти контролю на рівень готовності при довільному законі розподілу напрацювань до відмов і в разі проведення повного додаткового контролю працездатності. Це дозволяє виконати комплексне оцінювання готовності нерезервованого обладнання СРЗ, зокрема, в період післягарантійного обслуговування.

2. Уперше запропоновано математичну модель процесу ТО нерезервованого обладнання СРЗ, яке охоплене безперервним контролем працездатності, на кінцевому інтервалі експлуатації, яка, на відміну від відомих, отримана при довільному законі розподілу напрацювань до явних, прихованих та повторювальних відмов з урахуванням повноти контролю, що дає змогу здійснювати оцінювання готовності нерезервованого обладнання СРЗ на кінцевому інтервалі часу, зокрема, в період гарантійного обслуговування.

3. Уперше розроблено математичну модель процесу ТО резервованого обладнання СРЗ, яка, на відміну від відомих, дозволяє оцінювати коефіцієнт готовності обладнання для різних структур резервування з урахуванням характеристик явних, прихованих і повторювальних відмов, а також повноти контролю.

4. Удосконалено методи оцінювання повних експлуатаційних витрат у періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування, які, на відміну від відомих, ураховують види експлуатаційного резервування і дають змогу визначити прийнятний варіант експлуатаційного резервування і кількості запасних модулів в разі знаходження максимуму коефіцієнта готовності при обмеженні на повні експлуатаційні витрати або в разі знаходження мінімуму повних експлуатаційних витрат при обмеженні на коефіцієнт готовності.

Отримано наступні практичні результати:

– розроблено методика оцінювання готовності обладнання СРЗ, проведено розрахунки коефіцієнта готовності на прикладі обладнання компанії Huawei Technologies (КНР) і показано, що при зменшенні інтенсивності повторювальних відмов на 10% готовність обладнання СРЗ збільшується на 12%;

– розроблено методики оцінювання повних експлуатаційних витрат в періоди гарантійного та післягарантійного термінів обслуговування обладнання СРЗ і показано, що не дивлячись на те, що використання резервних і запасних ЗМ збільшує капітальні витрати CAPEX на 15–50% при дублюванні ЗМ, оперативні витрати OPEX зменшуються на 70–85%, що в сукупності підвищує ефективність експлуатації СРЗ;

– розроблено методику вибору прийняттого варіанту експлуатаційного резервування і кількості запасних зйомних модулів (ЗМ) при обмеженні на коефіцієнт готовності та мінімумі експлуатаційних витрат;

– розроблено імітаційний алгоритм і програму статистичного моделювання процесу експлуатації обладнання СРЗ, які дозволяють моделювати і оцінювати основні параметри процесу ТО;

– розроблено комплекс програмного забезпечення, яке дозволяє виконувати розрахунки за запропонованими методиками.

Отримані в рамках дисертації результати можуть бути використані під час розроблення, експлуатації та технічного обслуговування систем радіозв'язку.

Ключові слова: системи радіозв'язку, готовність, технічне обслуговування, резервування, повні експлуатаційні витрати, запасні частини, гарантійне та післягарантійне обслуговування, явна відмова, прихована відмова, повторювальна відмова, безперервний контроль працездатності, повнота контролю, регенеруючий процес.

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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

2. Терентьева И. Е. Метод оценки эффективности эксплуатации телекоммуникационных систем с учетом показателей надежности. *Телекомуникаційні та інформаційні технології*. – 2016. – № 1. – С. 113 – 119.

3. Терентьева И. Е. Структуризация та оцінювання готовності резервованого обладнання системи наземного радіодоступу UTRAN. *Радиоэлектроника и информатика*. – 2015. – № 3. – С. 3 – 8.

4. Одарченко Р. С., Терентьева И. Е., Гнап Р. В., Михайленко К. О. Дослідження перспективних технологічних рішень для стільникових мереж сімейства стандартів 5G. *Стандартизація, сертифікація, якість*. – К., 2016. – № 6(103). – С. 14–19.

5. Габрусенко Е. И., Тараненко А. Г., Терентьева И. Е. Методы формирования и оценки параметров кластера в сотовых системах мобильной связи. Водний транспорт. Збірник наукових праць Київської державної академії водного транспорту ім. гетьмана П. Конашевича-Сагайдачного. – К.: КДАВТ, 2014. – № 3(21). – С. 31–36.

6. Мачалин И. А., Андрухович П. А., Пузыренко А. Ю., Терентьева И. Е. Оценка уровня утечки информации за счет побочного электромагнитного излучения. Захист інформації. –2013. – № 2. – С. 159–164.

7. Мачалин І. О., Луцеїн В. І., Терентьева І. Є. Показники ефективності експлуатації апаратури сучасних мереж передачі даних. Захист інформації. –2005. – № 4. – С.68–72.

8. Мачалин І. О., Луцеїн В. І., Терентьева І.Є. Вибір визначальних параметрів відповідності обладнання сучасних систем передачі даних. Захист інформації. – 2005. – № 5. – С. 46–51.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Ulansky V. V., Terentyeva I. E. Availability assesement of a telecommunications system with permanent and intermittent faults. 2017 IEEE First Ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON), 29 May–2 June 2017: conference proceedings. – К., 2017. – pp. 908–911. (Scopus)

2. Габрусенко Е. И., Тараненко А. Г., Терентьева И. Е. Метод пространственного мультиплексирования данных в системах сотовой связи. Современные средства связи. XXI Міжнар. наук.-техн. конф., 20–21 жовтня 2016р.: тези доп. – Мінськ, Республіка Білорусь. – С. 47–48.

3. Терентьева І. Є. Оцінка доступності інформаційно-комунікаційних систем з урахуванням різних видів відмов. Інформаційна безпека та комп'ютерні технології: міжн. наук.-практ. конф., 24–25 березня 2016 р.: тези доп. – Кіровоград, 2016. – С. 135.

4. Терентьева І. Є. Показники оцінки ефективності структурної збитковості обладнання UMTS. Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: наук.-техн. конф., 17–19

листопада 2014 р.: тези доп. – К., 2014. – С. 58.

5. Terentyeva I. E. Optimization of the redundancy structure of broadband wireless access equipment. Проблеми навігації і управління рухом: Всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 18 - 20 листопада 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 118.

6. Уланский В. В., Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Методы обеспечения заданного уровня доступности сетей широкополосного радиодоступа UMTS/CDMA. Комп'ютерні системи та мережні технології: VII міжнар. наук.-техн. конф., 17–19 квітня 2014 р.: тези доп. – К., 2014. – С. 145.

7. Терентьева И. Е., Пузыренко А. Ю. Повышение защищенности информационно-коммуникационных систем на основе структурной избыточности. ITSEC: Безпека інформаційних технологій: III між нар. наук. конф., 21–24 травня 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 56.

8. Уланский В. В., Мачалин И. А., Терентьева И. Е., Варченко О. И. Оценка готовности оборудования универсальной наземной сети радиодоступа. Новітні технології в телекомунікаціях (ДУІКТ-Карпати-2013): VI міжнар. наук.-техн. симпоз., 21–25 січня 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 144–145.

9. Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Комбинированные методы резервирования оборудования телекоммуникационных систем. Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: наук.-техн. конф., 28–30 листопада 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 44.

10. Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Повышение качества услуг интегральных телекоммуникационных систем на основе повышения уровня надежности. Проблеми навігації і управління рухом: наук.-практ. конф., 28–29 листопада 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 102.

11. Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Алгоритм диагностирования телекоммуникационных систем. Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO-2012-Livadia): VIII міжнар. наук. конф., 4–8 жовтня 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 144.

ABSTRACT

Terentyeva I. E. Methods and models for ensuring the availability of radio systems. – Manuscript.

A dissertation submitted to the graduate committee of the National Aviation University specialized in “Radio engineering and television systems” – 05.12.17 in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. – Kyiv, 2017.

In the dissertation, the actual scientific and applied problem of developing the mathematical models of operation and maintenance (O & M) process of the radio systems (RS) equipment for ensuring the availability and methods that increase the efficiency of operation and maintenance of the RS equipment by reducing the operational expenditures while providing the appropriate level of the system availability.

In the dissertation, the analysis of previously published mathematical maintenance models of RS and technical and economic indicators of the efficiency assessment of the RS operation is carried out. The necessity in the development of mathematical models of the O&M process of continuously tested RS and improvement of the total operational expenditures assessment method that take into account fault coverage and the impact of the revealed, unrevealed, and intermittent failures is substantiated.

The main results of the dissertation consist in:

1. For the first time, the mathematical models of the O & M process of a non-redundant equipment of a continuously tested RS are developed which, in opposite to the known ones, allow take into account the impact of the revealed, unrevealed, and intermittent failures and fault coverage on the system availability under arbitrary failure distributions and additional testing. The developed models allow the evaluation of the O & M process efficiency on infinite time interval in particular for post-warranty period of service.

2. For the first time, the mathematical model of the O & M process of the RS non-redundant equipment is developed under arbitrary distributions to the revealed, unrevealed, and intermittent failures and different fault coverage. The model allows to

evaluate the effectiveness of the O & M process on a finite time interval, for example, during warranty period of service

3. For the first time, the mathematical model of the O & M process of the RS redundant equipment is developed, which, in opposite to the known models, allows to evaluate the system availability for different redundancy structures taking into account the revealed, unrevealed, and intermittent failure rates and fault coverage.

4. The methods for assessing the total operational expenditures during the warranty and post-warranty periods of service are improved taking into account, in opposite to the known ones, the different redundancy structures. The methods allow determining the optimal operational redundancy and the number of spare parts for the case of maximizing the average availability with a restriction on the operating costs and for the case of minimizing the operating costs with a restriction on the average availability.

Practical value of the obtained results:

- the method for assessing the availability of Huawei Technologies equipment has been developed. It has been shown that with decreasing the intermittent failure rate by 10%, the availability of the radio systems' equipment increases by 12%;

- the methods for assessing the total operational expenditures during the warranty and post-warranty period of service have been developed. It has been shown that using duplicated redundant and spare modules increases capital expenditures CAPEX by 15 - 50% but at the same time decreases operational expenditures OPEX by 70 - 85 %, which wholly improves the RS O & M process effectiveness;

- the method of determining the optimal operational redundancy and the number of spare parts has been developed for the case of minimizing the operating costs with a restriction on the average availability;

- the algorithm and program of the statistical modeling of the RS O & M process has been developed, which allows to evaluate the main parameters of the process;

- the corresponding software has been developed for numerical calculations based on the proposed in the dissertation models and methods.

The results of the dissertation can be used in the design, operation and maintenance of RS.

Keywords: radio systems, availability, maintenance, redundancy, total operational costs, spare parts, warranty and post-warranty service, revealed failure, unrevealed failure, intermittent failure, continuous testing, fault coverage, regenerative process.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	13
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВІДОМИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ГОТОВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ.....	22
1.1. Особливості побудови систем радіозв'язку.....	22
1.2. Аналіз особливостей обладнання і процесу технічної експлуатації систем радіозв'язку	27
1.3. Основні характеристики методів і засобів забезпечення експлуатаційної надійності систем радіозв'язку	31
1.4. Аналіз відомих показників, критеріїв і математичних моделей процесу експлуатації і технічного обслуговування цифрових електронних і радіотехнічних систем	36
1.5. Постановка задач дослідження.....	46
1.6. Висновки.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГО- ВУВАННЯ НЕРЕЗЕРВОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ.....	58
2.1. Постановка завдань.....	58
2.2. Математична модель ТО нерезервованого зйомного модуля СРЗ (Модель 1).....	59
2.3. Математична модель технічного обслуговування нерезервованого зйомного модуля СРЗ з урахуванням повного додаткового контролю (Модель 2).....	79
2.4. Математична модель технічного обслуговування нерезервованого зйомного модуля СРЗ на кінцевому	

	інтервалі часу (Модель 3).....	86
2.5.	Висновки.....	97
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99
РОЗДІЛ 3.	МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ РЕЗЕРВОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТА МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ПОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ	101
3.1	Постановка завдань.....	101
3.2	Математичні моделі технічного обслуговування резервованих ЗМ обладнання СРЗ.....	101
3.3	Розроблення показників для оцінювання експлуатаційних витрат резервованих систем радіозв'язку.....	109
3.4	Методи оцінювання повних експлуатаційних витрат в періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування обладнання СРЗ	114
3.5	Висновки.....	120
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	121
РОЗДІЛ 4	МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ГОТОВНОСТІ, ПОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ І ВИЗНАЧЕННЯ ПРИЙНЯТНОГО ВАРІАНТУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РЕЗЕРВУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ.....	123
4.1.	Особливості побудови обладнання сучасних систем радіозв'язку.....	123
4.2.	Особливості забезпечення надійності та готовності обладнання СРЗ	124
4.3.	Методика оцінювання готовності обладнання СРЗ.....	129
4.4.	Методики оцінювання повних експлуатаційних витрат в періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування обладнання СРЗ.....	134

4.5. Методика визначення прийняттого варіанту експлуатаційного резервування і кількості запасних ЗМ обладнання СРЗ	143
4.6. Верифікація математичних моделей	144
4.3. Висновки.....	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	150
ВИСНОВКИ.....	152
Додаток А. Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації. Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.....	155
Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	158

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГТО	– гарантійний термін обслуговування
ЗМ	– зйомний модуль
ЗЗМ	– запасний зйомний модуль
КГ	– коефіцієнт готовності
МС	– математичне сподівання
ПГТО	– післягарантійний термін обслуговування
ПДКП	– повний додатковий контроль працездатності
ПЗ	– програмне забезпечення
СРЗ	– система радіозв'язку
ТО	– технічне обслуговування
ТМЗК	– телефонна мережа загального користування
ТЕ	– технічна експлуатація
ФР	– функція розподілу
CAPEX	– Capital expenditure – капітальні витрати
OPEX	– Operational expenditure – операційні витрати
ТСО	– Total cost of ownership – повні експлуатаційні витрати
QoS	– quality of service – якість обслуговування

ВСТУП

Актуальність теми. Глобальність масштабів застосування систем радіозв'язку (СРЗ), надзвичайна різноманітність і важливість багатьох розв'язуваних на їхній основі завдань, величезні розміри абонентських баз користувачів зумовлюють високі вимоги щодо забезпечення норм на показники надійності функціонування й готовності обладнання систем. Так, значення коефіцієнта готовності сучасних СРЗ повинен бути не менше, ніж 0,9999, а в деяких відповідальних випадках – наближатися до 0,99999. Тому тема дисертації, спрямована на забезпечення необхідного рівня готовності сучасних СРЗ є **актуальною**.

Зрозуміло, що без застосування методів експлуатаційного резервування СРЗ здійснити дотримання таких норм не уявляється можливим. Тому в сучасних системах широко використовуються різноманітні методи експлуатаційного резервування. При виборі методу резервування слід мати на увазі, що основні види обладнання СРЗ та запасні модулі до нього мають високу вартість. Також треба враховувати великі обсяги устаткування, що експлуатується, і його номенклатурну різноманітність. Внаслідок цього екстенсивні методи підвищення ступеня експлуатаційного резервування обладнання СРЗ пов'язані з різким збільшенням експлуатаційних витрат. В таких умовах оптимізація схем і процедур резервування обладнання СРЗ, а також оптимізація кількості запасних частин при заданому рівні готовності, є основними заходами по оптимізації експлуатаційних витрат.

Питаннями оцінювання показників надійності технічних систем і їхнім математичним моделюванням займалося багато вчених, а саме: Ушаков І. О., Козлов Б. О., Креденцер Б. П., Гнеденко Б. В., Коваленко І. М., Барзилович Є. Ю., Каштанов В. О., Соловйов О. Д., Стрельников В. П., Уваров Б. М., Cox D., Smith W., Nakagava T., Pham H., Barlow R., Proshan F., Weichelt F. та ін. Однак, як показав проведений аналіз, відомі показники не враховують особливості сучасних СРЗ та вимоги, які висуваються до рівня готовності обладнання.

Особливістю обладнання сучасних СРЗ є використання цифрового способу обробки інформації та комутації, тому таким системам поряд з поступовими і

раптовими (явними і прихованими) відмовами притаманні повторювальні відмови. Вбудовані системи контролю і тестування обладнання СРЗ мають різну повноту контролю, від величини якої залежить правильне прийняття рішення про технічний стан. Тому необхідно розробити математичні моделі, які дозволять визначати рівень готовності обладнання СРЗ з урахуванням цих особливостей. Крім того, слід враховувати той факт, що в періоди гарантійного та післягарантійного обслуговування надійнісні та вартісні показники процесу експлуатації можуть істотно відрізнятись. Отже математичні моделі повинні здійснювати оцінювання готовності як на нескінченному, так і на кінцевому інтервалах експлуатації СРЗ.

Таким чином, розроблення математичних моделей і методів забезпечення готовності обладнання СРЗ є **важливим науково-технічним завданням**, вирішення якого сприятиме забезпеченню високого рівня готовності та необхідної якості послуг, які надаються сучасними СРЗ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з науковими дослідженнями, які проводяться протягом декількох років в Національному авіаційному університеті і спрямовані на підвищення ефективності експлуатації СРЗ. Обраний напрямок досліджень безпосередньо пов'язаний з реалізацією положення «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні» (затверджено Кабінетом Міністрів України від 15 травня 2013 р.).

Основні наукові результати отримані в рамках наступних науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт: шифр № 874-ДБ13 «Створення та дослідження нових систем захищеного авіаційного радіозв'язку в рамках концепції CNS/ATM ICAO» (№ ДР 0113U000093)»; договір про наукове співробітництво між НАУ и ДП «НДІ» Квант» № 2/2013 от 27.02.2013 р. «Простір-Ф», ФІЯЕ. 461321.004, № ДР РК0108U000066Т; договір про наукове співробітництво між НАУ та Державним науково-дослідним інститутом спеціального зв'язку та захисту інформації № 7/16СД від 20.07.2016 р., шифр «Базис» № ДР 0115U000021т.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розв'язання актуальної науково-прикладної задачі розроблення математичних моделей процесу

ТО СРЗ для оцінювання готовності СРЗ та методів, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації СРЗ за рахунок зниження експлуатаційних витрат при підтримці належного рівня готовності систем. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові задачі:

- провести аналіз обладнання СРЗ з погляду надійності та контролепридатності; провести класифікацію методів і видів резервування обладнання СРЗ; провести аналіз відомих математичних моделей процесу ТО і техніко-економічних показників оцінки ефективності експлуатації СРЗ;

- розробити математичні моделі процесу ТО нерезервованого обладнання СРЗ, яке охоплене безперервним контролем працездатності, за різної повноти контролю на нескінченному інтервалі експлуатації з урахуванням впливу явних, прихованих і повторювальних відмов, а також для випадку проведення повного додаткового контролю працездатності (ПДКП);

- розробити математичну модель процесу ТО нерезервованого обладнання СРЗ, яке охоплене безперервним контролем працездатності, на кінцевому інтервалі експлуатації з урахуванням впливу явних, прихованих і повторювальних відмов, а також повноти контролю;

- розробити математичну модель ТО резервованого обладнання СРЗ, яка дозволить оцінювати значення коефіцієнта готовності обладнання для різних структур резервування;

- удосконалити методи оцінювання повних експлуатаційних витрат обладнання СРЗ в періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування з урахуванням видів експлуатаційного резервування, які дозволять визначати прийнятний варіант експлуатаційного резервування і кількості запасних модулів в разі знаходження максимуму коефіцієнта готовності при обмеженні на повні експлуатаційні витрати або в разі знаходження мінімуму повних експлуатаційних витрат при обмеженні на коефіцієнт готовності;

- розробити імітаційний алгоритм і програму статистичного моделювання процесу технічної експлуатації СРЗ, що дозволить моделювати і оцінювати основні параметри процесу ТО;

– розробити методики і програмне забезпечення для оцінювання основних показників ефективності процесу ТО обладнання СРЗ.

Об'єкт дослідження – процес технічної експлуатації обладнання систем радіозв'язку.

Предмет дослідження – математичні моделі та методи забезпечення готовності обладнання систем радіозв'язку.

Методи дослідження базуються на апараті теорії надійності, теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії управління запасами, теорії відновлення, теорії регенеруючих випадкових процесів, теорії математичного моделювання і вибору оптимального варіанту, методах імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Уперше розроблено математичні моделі процесу ТО нерезервованого обладнання СРЗ, яке охоплене безперервним контролем працездатності, на нескінченному інтервалі експлуатації, які, на відміну від відомих, одночасно враховують вплив явних, прихованих і повторювальних відмов, а також повноти контролю на рівень готовності при довільному законі розподілу напрацювань до відмов і в разі проведення повного додаткового контролю працездатності. Це дозволяє виконати комплексне оцінювання готовності нерезервованого обладнання СРЗ, зокрема, в період післягарантійного обслуговування.

2. Уперше запропоновано математичну модель процесу ТО нерезервованого обладнання СРЗ, яке охоплене безперервним контролем працездатності, на кінцевому інтервалі експлуатації, яка, на відміну від відомих, отримана при довільному законі розподілу напрацювань до явних, прихованих та повторювальних відмов з урахуванням повноти контролю, що дає змогу здійснювати оцінювання готовності нерезервованого обладнання СРЗ на кінцевому інтервалі часу, зокрема, в період гарантійного обслуговування.

3. Вперше розроблено математичну модель процесу ТО резервованого обладнання СРЗ, яка, на відміну від відомих, дозволяє оцінювати коефіцієнт готовності обладнання для різних структур резервування з урахуванням ха-

рактеристик явних, прихованих і повторювальних відмов, а також повноти контролю.

4. Удосконалено методи оцінювання повних експлуатаційних витрат у періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування, які, на відміну від відомих, ураховують види експлуатаційного резервування і дають змогу визначити прийнятний варіант експлуатаційного резервування і кількості запасних модулів в разі знаходження максимуму коефіцієнта готовності при обмеженні на повні експлуатаційні витрати або в разі знаходження мінімуму повних експлуатаційних витрат при обмеженні на коефіцієнт готовності.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень. Підтверджується коректним використанням сучасного математичного апарату, застосуванням наукових положень теорії надійності і експлуатації технічних систем, узгодженістю отриманих теоретичних результатів з експериментальними і експлуатаційними даними, а також результатами імітаційного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів. Теоретичні результати, отримані в дисертації, дозволяють комплексно вирішувати завдання забезпечення готовності обладнання СРЗ. Практичні результати роботи полягають в наступному:

– розроблено методику оцінювання готовності обладнання СРЗ, проведено розрахунки коефіцієнта готовності на прикладі обладнання компанії Huawei Technologies (КНР) і показано, що при зменшенні інтенсивності повторювальних відмов на 10% готовність обладнання СРЗ збільшується на 12%;

– розроблено методики оцінювання повних експлуатаційних витрат в періоди гарантійного та післягарантійного термінів обслуговування обладнання СРЗ і показано, що не дивлячись на те, що використання резервних і запасних ЗМ збільшує капітальні витрати CAPEX на 15–50% при дублюванні ЗМ, оперативні витрати OPEX зменшуються на 70–85%, що в сукупності підвищує ефективність експлуатації СРЗ;

– розроблено методику вибору прийнятного варіанту експлуатаційного резервування і кількості запасних зйомних модулів (ЗМ) при обмеженні на коефіцієнт готовності та мінімумі експлуатаційних витрат;

– розроблено імітаційний алгоритм і програму статистичного моделювання процесу технічної експлуатації обладнання СРЗ, які дозволяють моделювати і оцінювати основні параметри процесу ТО;

– розроблено комплекс програмного забезпечення, який дозволяє виконувати розрахунки за запропонованими методиками.

Матеріали дисертаційної роботи впроваджено в ДП «Науково-дослідному інституті «Квант» (акт від 25.12.2014 р.), в Державному науково-дослідному інституті спеціального зв'язку та захисту інформації (акт від 22.12.2016 р.), у навчальному процесі Національного авіаційного університету (акт від 15.12.2017 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Роботи [2, 3, 11, 12, 13] виконані без співавторів. Деякі роботи виконані у співавторстві з науковим керівником та іншими вченими. Зокрема, здобувачу належать: в роботах [1, 9] - математична модель процесу ТО нерезервованих блоків для довільних законів розподілу наробітку електронного цифрового обладнання до відмови та з урахуванням повторювальних відмов і повноти контролю; в роботі [4] - дослідження особливостей обладнання стільникових мереж сімейства стандартів 5G; в роботі [5] - модель формування кластера в стільникових мережах мобільного зв'язку; в роботі [6] – методика оцінювання загасання побічного електромагнітного випромінювання; в роботах [7, 8] – математичні моделі контролю відповідності параметрів апаратури мереж передачі даних; в роботі [10] – метод просторового мультиплексування даних в системах стільникового зв'язку; в роботах [14–17] - математичні моделі оцінювання готовності обладнання мереж радіодоступу; в роботі [18] - розроблення методу підвищення надійності телекомунікаційних систем; в роботі [19] - розроблення методу діагностування обладнання телекомунікаційних систем

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати, отримані автором, доповідалися та обговорювалися на наступних конференціях і симпозіумах: VIII Міжнародна наукова конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (COMINFO–2012–Livadia), 4–8 жовтня 2012 р., Ливадія; Науково-практична конференція «Проблеми навігації і управління рухом», 28–29

листопада 2012 р., Київ; Науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM», 28–30 листопада 2012 р., Київ; VI Міжнародний науково-технічний симпозіум «Новітні технології в телекомунікаціях (ДУІКТ–Карпати–2013)», 21–25 січня 2013 р., пгт. Славське; III Міжнародна наукова конференція ITSEC: «Безпека інформаційних технологій», 21–24 травня 2013 р., Київ; Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Проблеми навігації і управління рухом», Київ, НАУ, 18–20 листопада 2013 р.; VII Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології», 17–19 квітня 2014 р., Київ; науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM», 17–19 листопада 2014 р., Київ; Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційна безпека та комп'ютерні технології», 24–25 березня 2016 р., Кіровоград; XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Современные средства связи», 20–21 жовтня 2016 р. Мінськ, Республіка Білорусь; 2017 IEEE First Ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON), Kyiv, 29 May–2 June, 2017.

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано у 19 друкованих наукових працях, серед яких 7 статей – у спеціалізованих періодичних виданнях, які включені в «Перелік наукових фахових видань України», затверджений МОН України, та до міжнародних науково-метричних баз, та 1-а стаття – в періодичному виданні, яке входить до міжнародної науково-метричної бази Scopus. Також опубліковано 11 тез доповідей у матеріалах міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій. Зокрема, одна публікація на конференції, яка проводилася міжнародною організацією IEEE, з публікацією в працях конференції, які входять до міжнародної науково-метричної бази Scopus.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел, який подається після кожного розділу, загальних висновків і двох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 161 сторінку. В дисертації наведено 39 рисунків (у тому числі один рисунок на одній

окремій сторінці), 19 таблиць (у тому числі одна таблиця на двох окремих сторінках), 111 найменувань використаних джерел на 11 сторінках та 7-ми сторінок додатків

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ГОТОВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

1.1. Особливості побудови систем радіозв'язку.

1.1.1. Системи мобільного радіозв'язку покоління 3G. UMTS (Universal Mobile Telecommunications System – універсальна мобільна телекомунікаційна система) – технологія стільникового зв'язку, розроблена Європейським Інститутом Стандартів Телекомунікацій (ETSI) для впровадження 3G в Європі. Як спосіб передачі даних через повітряний простір використовується технологія W-CDMA, стандартизована відповідно до проекту 3GPP. Мережа UMTS побудована на базі радіоінтерфейсу UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) [1– 8]. На рис. 1.1. приведена архітектура системи UMTS/UTRAN.

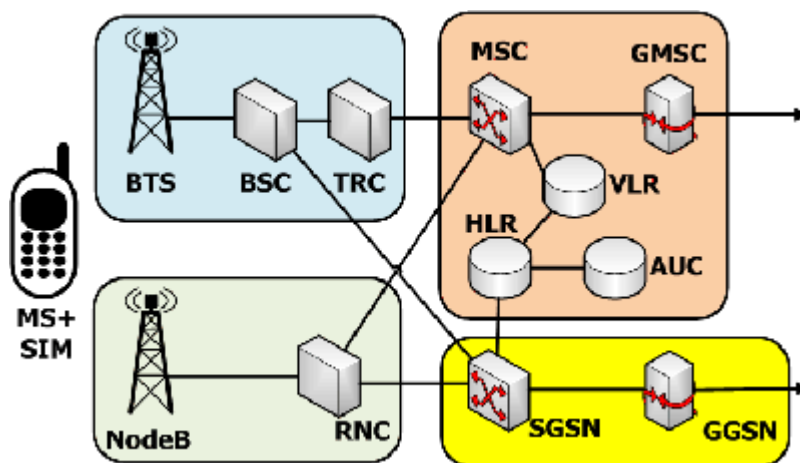


Рис. 1.1. Архітектура системи UMTS [4]

Як показано в [4–8], опорна мережа (Core Network) – ядро мереж стільникового зв'язку – розділена на 2 частини – верхня права частина відповідає за голосові з'єднання, або CS – з'єднання (Circuit Switch), нижня права частина відповідає за пакетні з'єднання, або ж PS – з'єднання (Packet Switch).

HLR – Home Location Register, реєстр положення домашніх абонентів. По суті це велика база даних, в якій зберігається все про абонента даної мережі. У великих мережах, таких як у операторів великої трійки («Київстар», «Лайфсел» та «Водафон»), таких вузлів кілька – вони розкидані по регіонах. На практиці це може бути розподілена база даних, тому що ємності одного HLR може не вистачити для зберігання даних про всі абонентах.

MSC – Mobile Switching Center, центр комутації для мобільних абонентів; VLR – Visitor Location Register, реєстр стану гостей абонентів. Логічно це 2 роздільних вузла, але на практиці вони реалізовані в одному і тому ж пристрої.

VLR зберігає в собі копію тих даних, які записані в HLR з тією лише різницею, що тут вже немає інформації про той MSC, в зоні дії якого знаходиться абонент. Тут зберігається інформація про те, в зоні дії якого BSC знаходиться даний абонент. Також, у VLR, природно, зберігаються дані тільки про тих абонентів, які зараз знаходяться в зоні дії того MSC, до якого підключений даний VLR.

MSC – класичний комутатор. Основні його функції – для вихідного дзвінка – визначити, куди переключити виклик, для вхідного ж з'єднання – визначити, на який BSC відправити виклик. Для виконання цих функцій він звертається в VLR за що зберігається там інформацією. Також комутатор MSC збирає дані для білінгу.

AUC – AUthentication Center, центр аутентифікації абонентів. Цей вузол відповідає за те, щоб зловмисник не міг отримати доступ до мережі від вашого імені. Також цей вузол генерує ключі шифрування, за допомогою яких шифрується ваше з'єднання з мережею в найбільш вразливому місці – на радіоінтерфейсі.

GMSC – Gateway MSC, шлюзовий комутатор. Цей вузол мережі використовується тільки при вхідних дзвінках. У операторів є певна номерна ємність, якій зіставляються шлюзові комутатори мереж зв'язку (стільникових, фіксованих).

SGSN – Serving GPRS Support Node, обслуговуючий вузол підтримки GPRS. Цей вузол відповідає за те, щоб визначити яким чином надавати послуги на основі запитаної APN (Access Point Name – точки доступу). Також на цьому вузлі здійснюється підрахунок трафіку.

BSC – Base Station Controller, контролер базових станцій в стандарті GSM. Вузол, до якого підключаються базові станції, далі він здійснює управління базовими станціями – призначає якому абоненту, де і скільки ресурсів виділити, визначає яким чином здійснюються хендовери. Коли з MSC приходить сигнал про вхідне з'єднання для абонента, контролер здійснює процедуру пейджінга – через всі підлеглі йому базові станції посилає виклик даному абоненту, який повинен відгукнутися через одну з базових станцій.

BTS – Base Transceiver Station в стандарті GSM, базова приймально-передаюча станція. Саме від їхньої кількості залежить територія, на якій надають послуги оператори стільникового зв'язку.

RNC – Radio Network Controller в UMTS, контролер мережі радіодоступу. Виконує управління всіма базовими станціями і управління ресурсами.

NodeB, базова станція в UMTS. Аналог BTS в GSM.

1.1.2. Системи мобільного радіозв'язку покоління 4G. Принципи побудови і функціонування мереж мобільного радіозв'язку LTE. LTE (Long Term Evolution) є вдосконаленою системою UMTS для забезпечення зростаючих вимог до швидкості передачі і включає в себе мережу радіодоступу (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN) і вдосконалене пакетне ядро (Evolved Packet Core, EPC) [9].

Мережа LTE побудована як сукупність нових базових станцій eNB (Evolved NodeB або eNodeB), де сусідні eNB з'єднані між собою інтерфейсом X2. Станції eNB підключені до EPC за допомогою інтерфейсу S1. На рис. 1.2 показано взаємодію нових елементів в архітектурі мережі: S-GW (Serving Gateway) – обслуговуючих шлюзів, які містять програмне забезпечення (ПЗ) управління по протоколу MM (MME – Mobility Management Entity) [9].

Як показано в [9], у мережі радіодоступу радіоінтерфейс між обладнанням користувачів UE і eNB здійснений на основі технології ортогонального частотного рознесення (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDMA). Робота EPC заснована на технології IP. Таку структуру відносять до All-IP Network (AIPN).

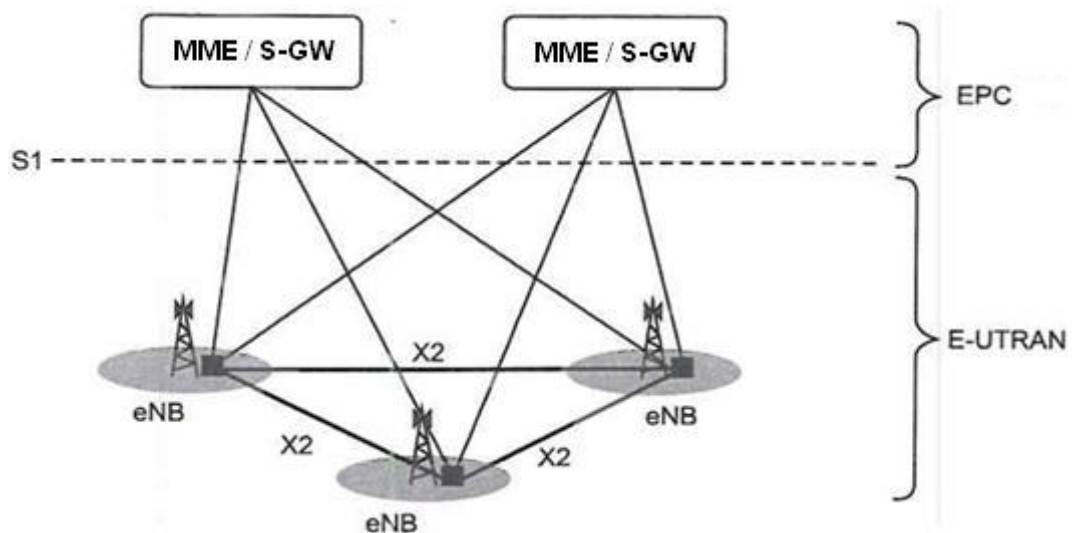


Рис. 1.2 Взаємодія між елементами архітектури мережі LTE [9]

Структура мережі LTE приведена на рис. 1.3. Ядро мережі EPC (Evolved Packet Core) складається з обслуговуючого шлюзу S-GW (Serving Gateway), шлюзу для виходу на пакетні мережі P-GW (Packet Data Network Gateway), структури управління по протоколу Mobility Management MME (Mobility Management Entity), пов'язаної з S-GW і eNodeB сигнальними інтерфейсами.

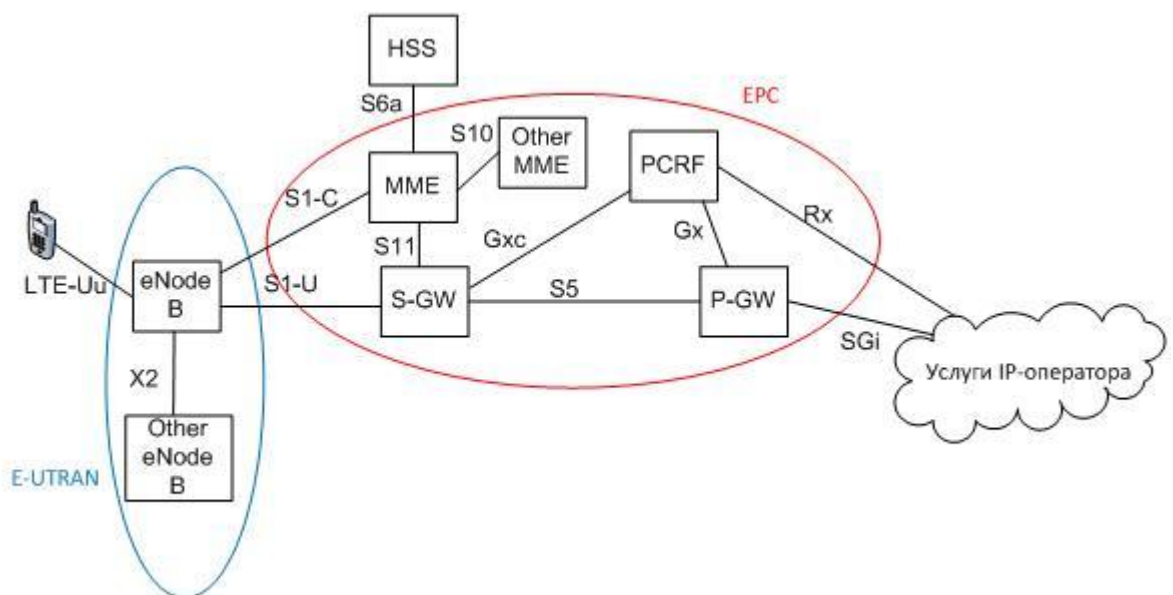


Рис. 1.3. Структура мережі LTE [9]

Станція eNB об'єднує в собі функції базових станцій і контролерів мереж покоління 3G:

- забезпечує передачу трафіку і сигналізації по радіоканалу;
- керує розподілом радіоресурсів;

- забезпечує наскрізний канал трафіку до S-GW;
- підтримує синхронізацію передач і контролює рівень перешкод в стільнику;
- забезпечує шифрацію і цілісність передачі по радіоканалу;
- вибирає MME і організовує сигнальний обмін з ним;
- виробляє стиснення заголовків IP-пакетів;
- підтримує послуги мультимедійного мовлення;
- при використанні структури з підсилювачами потужності на антенній мачті організовує керування антенами за спеціальним інтерфейсу Iuant.

Інтерфейс S1, як показано на рис. 1.3, підтримує передачу даних з S-GW і сигналізації через MME. Відзначимо, що eNB може мати з'єднання з декількома S-GW.

Інтерфейси X2 використовують для організації хендовера між сусідніми базовими станціями, в тому числі і при балансуванні навантаження між ними. При цьому інтерфейси X2 можуть бути логічними, тобто для їхньої організації не обов'язково реальне фізичне з'єднання між eNB.

У функції обслуговуючого шлюзу S-GW входить:

- маршрутизація пакетів даних, які передаються;
- установка якісних показників (QoS) послуг, які надаються;
- буферизація пакетів для UE, які перебувають в стані IdleMode;
- надання облікових даних для тарифікації та оплати наданих послуг.

S-GW забезпечує мобільність абонентів, кожен працюючу UE обслуговує певний S-GW. Теоретично UE може бути пов'язана з декількома пакетними мережами; тоді її будуть обслуговувати кілька серверів S-GW.

Шлюз для виходу на пакетні мережі P-GW організовує точку доступу до зовнішніх IP-мереж. Відповідно P-GW є якірним шлюзом для забезпечення трафіку. Якщо абонент має статичну IP-адресу, то P-GW його активізує. У разі, якщо абонент повинен отримати на час сеансу зв'язку динамічну IP-адресу, P-GW запитує його з сервера DHCP (DynamicHostConfigurationProtocol) або сам виконує необхідні функції DHCP, після чого забезпечує доставку IP-адреси абоненту.

До складу P-GW входить PCEF (Policy and Charging Enforcement Function), який забезпечує якісні характеристики послуг на зовнішньому з'єднанні через інтерфейс Sgi і фільтрацію пакетів даних. При обслуговуванні абонента в домашній мережі функції P-GW і S-GW можуть виконувати як два різних, так і один пристрій. Інтерфейс S5 являє собою з'єднання тунельне GPRS або Proxy Mobile IPv6. Якщо P-GW і S-GW знаходяться в різних мережах (наприклад, при обслуговуванні абонента в роумінгу), то інтерфейс S5 замінюють інтерфейсом S8.

Керуючий блок MME насамперед підтримує виконання процедур протоколу Mobility Management: забезпечення безпечної роботи в мережі при підключенні UE і вибір S-GW, P-GW. MME пов'язаний з HSS своєї мережі за допомогою інтерфейсу S6a. Інтерфейс S10, який з'єднує різні MME, дозволяє обслуговувати UE при переміщеннях абонента, а також при його знаходженні в роумінгу.

Policy and Charging Resource Function (PCRF) є керуючим сервером, який забезпечує централізоване управління ресурсами мережі, облік і тарифікацію послуг, які надаються. Як тільки з'являється запит на нове активне з'єднання, ця інформація надходить на PCRF. Він оцінює наявні в його розпорядженні ресурси мережі й направляє в PCEF шлюзу P-GW команди, які встановлюють вимоги до якості послуг і до їхньої тарифікації [9].

1.2. Аналіз особливостей обладнання і процесу технічної експлуатації систем радіозв'язку.

Аналіз особливостей обладнання і процесу технічної експлуатації сучасних СРЗ [1–13] показав наступне:

1. Сучасні СРЗ складаються з великої номенклатури обладнання (антенно-фідерні пристрої, маршрутизатори, шлюзи, комутатори, сервери і т.д.). Особливістю обладнання сучасних СРЗ є цифровий спосіб оброблення інформації та комутації. Навіть ті вузли, які забезпечують сполучення з мережами ОКС7, здійснюють аналого-цифрове перетворення вхідних сигналів.

2. Як правило, всі системи охоплені безперервним контролем технічного стану. Для контролю працездатності обладнання в процесі функціонування використовуються вбудовані системи контролю і тестування. При цьому тестування

може бути частковим – для швидкої перевірки основних параметрів (триває від кількох секунд до кількох хвилин) і повними – для перевірки усіх параметрів, які можуть бути охоплені системою контролю (триває від кількох хвилин до кількох годин). Часто тестування виконується у фоновому режимі.

Таким чином, системи контролю і тестування можуть мати різну повноту контролю, від величини якої буде залежати правильне прийняття рішення про стан обладнання. Тому при розробленні моделей процесу технічної експлуатації і обслуговування обладнання СРЗ необхідно враховувати вплив повноти контролю на показники процесу ТО.

4. Для сучасних СРЗ характерні наступні види відмов: за характером усунення – сталі та повторювальні відмови; за характером зміни основних параметрів – раптові та поступові відмови; за можливістю виявлення – явні та приховані відмови.

До сталих відмов відносяться відмови, після виникнення яких обладнання не може перейти до стану працездатності без операцій по підновленню.

Оскільки до складу обладнання СРЗ входять цифрові інтегральні мікросхеми та мікропроцесори, які працюють на базі ПЗ, такому обладнанню притаманні повторювальні відмови і збої [14]:

- повторювальна відмова – самоусувна відмова одного і того ж характеру, яка виникає багато разів;
- збій – самоусувна відмова або одноразова відмова, яку незначним втручанням усуває оператор.

Причинами повторювальних відмов електронного обладнання можуть бути короткочасні відмови друкованих плат або їхніх компонентів, відмови внаслідок порушення межкомпонентних зв'язків, а також мікротріщини в місцях пайки навісних елементів через пошкодження від корозії або втоми матеріалу. Для програмного забезпечення це буде короткочасна відсутність сигналу або невірне зчитування (накладення) змінних [15, 16].

Оскільки збій може бути усунутий оператором (за визначенням), то в загальному випадку його прояв зводиться до прояву раптової відмови. Тому далі в моделях будемо враховувати тільки повторювальні відмови.

Раптова відмова – відмова, яку неможливо передбачити попередніми дослідженнями або технічним оглядом. Поступова відмова – відмова, викликана поступовими змінами значень одного або декількох параметрів об'єкта. Поступову відмову можна передбачити попередніми дослідженнями або технічним оглядом, іноді її можна запобігти заходами технічного обслуговування [14].

Під явними відмовами будемо розуміти відмову, яка виявляється візуально чи штатними методами і засобами контролю та діагностування при підготовці об'єкту до використання або в процесі його використання за призначенням [14]. Відмови, які відбуваються в частині обладнання, яка охоплена контролем, класифікуються як явні.

Неповна повнота контролю призводить до того, що частина відмов за результатами контролю не виявляється. Такі відмови далі будемо відносити до прихованих. Отже, прихована відмова – відмова, яка не виявляється візуально або штатними методами і засобами контролю і діагностики, але виявляється при проведенні технічного обслуговування або спеціальними методами діагностики [14].

Таким чином, з проведеного аналізу випливає, що математичні моделі, які розробляються, повинні враховувати:

- особливості процесу безперервного контролю технічного стану блоків і модулів;
- повноту контролю блоків і модулів;
- вплив раптових (явних і прихованих), поступових і повторювальних відмов на готовність обладнання.

Задля підтримки заданих рівнів забезпечення надійності та готовності обладнання СРЗ реалізуються наступні функціональні можливості [17, 18]:

1. Функція безперервного і періодичного контролю визначальних параметрів обладнання за допомогою спеціалізованих засобів контролю з метою виявлення невідповідностей в роботі обладнання. У разі виявлення невідповідності при передачі, інформація про цю подію подається на пристрої (засоби) ідентифікації невідповідностей, які реалізується, як правило, в складі системи тривожної сигналізації (alarm system).

2. Функція ідентифікації невідповідності. За результатами ідентифікації передача інформації на вхід спеціалізованої виконавчої системи (recovery system), яка забезпечує локалізацію виявленої невідповідності.

3. Функція детального аналізу характеристик виявленої невідповідності за допомогою діагностичної системи. Надання результатів такого аналізу адміністраторам системи або мережі та спеціалізованим експертним системам.

4. Функція включення резервного навантаженого елемента (якщо він існує) в роботу замість невідповідного елемента (зокрема, в разі його відмови), яке здійснюється автоматично або вручну.

5. Функція переміщення ресурсу невідповідного елемента на групу інших елементів обладнання з пулу певного функціонального ресурсу.

6. Функція ізоляції елемента, який відмовив, від інших елементів обладнання з метою обмеження наслідків виникнення невідповідності, його автономної діагностики і (або) демонтажу.

7. Функція переведення ненавантаженого резервного елемента в стан навантаженого резервування (здійснюється автоматично або вручну).

8. Функція оновлення програмного забезпечення. Для цього обладнання комплектується відповідними програмними модулями. У разі необхідності ці модулі забезпечують перезавантаження ПЗ. Будь-яка базова станція або системи керування зберігають у флеш-пам'яті як поточну, так і попередню конфігурацію ПЗ. Якщо, наприклад, станеться випадкове переривання в електропостачанні, то протягом декількох секунд поточна конфігурація ПЗ буде перезавантажена з флеш-пам'яті в оперативну пам'ять.

9. Функція верифікації обладнання з метою підтвердження його справності.

Крім того, обладнання СРЗ реалізує наступні корисні можливості, які сприяють його надійній роботі:

- можливість зберігання інформації про виниклі тривожні події в журналі реєстрації подій невідповідностей (alarm history);

- можливість зберігання на дисковій пам'яті (яка функціонує за принципом кільця, тобто нова інформація витісняє стару) всієї технологічної інформації;

- реалізація функції підтримки контрольного журналу (Audit Trail), тобто журналу реєстрації всіх подій, які мають відношення до забезпечення підтримки процесу експлуатації. На базі аналізу даних цього журналу здійснюється моніторинг подій і процесів, пов'язаних з резервуванням обладнання. В лог-файлах всіх мережевих елементів в реальному часі фіксується вся технологічна інформація, пов'язана з будь-якими змінами стану цих системних або мережевих елементів, в т.ч. фіксуються всі події і (або) параметри об'єктів і процесів, які впливають на забезпечення надійної роботи обладнання.

Вищенаведений аналіз основних характеристик обладнання СРЗ, методів і засобів забезпечення його надійності свідчить про можливість удосконалення методу для визначення оптимальних технологій резервування обладнання з метою підвищення ефективності його експлуатації.

1.3. Основні характеристики методів і засобів забезпечення експлуатаційної надійності систем радіозв'язку.

1.3.1. Основні види резервування обладнання СРЗ. На сьогодні не існує системи, яка гарантує 100% відмовостійкість. Іншими словами, не існує системи, яка гарантує 100% ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого інтервалу часу, тобто 100% готовності.

Існує два основних напрямки побудови відмовостійких систем. Перший спосіб – це використання тільки відмовостійких компонентів. При реалізації цього напрямку кожен компонент системи може продовжувати своє функціонування, навіть якщо один / кілька підкомпонентів системи виходять з ладу. Другий спосіб – розроблення методів, які гарантують побудову відмовостійкої системи з компонентів, які не є відмовостійкими. В таких системах відмовостійкість реалізована за рахунок введення різних видів надмірності і розроблення спеціального програмного забезпечення, елементних взаємозв'язків і алгоритмів функціонування.

Розрізняють такі види резервування обладнання СРЗ [14, 17–21]:

1. *Структурне резервування* (structural redundancy) полягає у використанні резервних елементів структури системи і для радіотехнічних систем є апаратним резервуванням (hardware redundancy). Один із видів структурного резервування – географічне резервування (geographic redundancy), коли створюється резервний вузол на майданчику в істотному видаленні від основного.

2. *Функціональне резервування* (functional redundancy) – резервування, при якому використовується здатність елементів об'єкта виконувати додаткові функції.

3. *Програмне резервування* (software redundancy) використовується для контролю і забезпечення достовірності найбільш важливих рішень з керування та оброблення інформації. Воно полягає в зіставленні результатів оброблення однакових вихідних даних різними програмами і виключення спотворення результатів, обумовлених різними аномаліями.

4. *Інформаційне резервування* (information redundancy) найбільш притаманне системам, в яких інформація передається багато разів. Інформаційна надмірність полягає в дублюванні накопичених вихідних і проміжних даних.

5. *Часове резервування* (time redundancy) полягає у використанні певної частини продуктивності комп'ютера для контролю за виконанням програм та відновлення (рестарту) обчислювального процесу (запас часу для повторного виконання операції, наприклад, з подвійним або потрійним прорахуном на обчислювальній машині).

Розглянемо основні види апаратного резервування, які можуть бути використані в СРЗ [22–28].

Загальне резервування (whole system redundancy) – резервування, при якому резервується об'єкт в цілому.

Роздільне резервування (segregated redundancy) – резервування, при якому резервуються окремі елементи об'єкта або їхні групи.

Постійне резервування; паралельне резервування (continuous redundancy) – резервування з навантаженим резервом, за яким всі N елементів в резервованій системі виконують одну і ту ж функцію і є рівноправними. За відмові будь-якого

елементу в резервованій групі виконання об'єктом необхідних функцій забезпечується без перемикань схемою «голосування» рештою елементами (до нього відноситься мажоритарне резервування і метод голосування). Постійне резервування дозволяє отримати системи з найвищим коефіцієнтом готовності.

Резервування заміщенням (standby redundancy) – резервування, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного елемента. Резервування заміщенням може бути з навантаженим, ненавантаженим або полегшеним резервом. Його недоліком є залежність від надійності перемикаючих пристроїв.

Навантажений резерв (active reserve) – резерв, при якому один або декілька резервних елементів знаходяться в режимі основного елемента.

Полегшений резерв (reduced reserve) – резерв, при якому є один або кілька резервних елементів, які знаходяться в менш навантаженому режимі, ніж основний елемент.

Ненавантажений резерв (standby reserve) – резерв, при якому є один або кілька резервних елементів, які знаходяться в ненавантаженому режимі до початку виконання ними функцій основного елемента.

Ковзне резервування (sliding redundancy) – резервування заміщенням, при якому група основних елементів резервується одним або декількома резервними елементами, кожен з яких може замінити будь-який з елементів цієї групи в разі його відмови.

Кратність резервування – відношення числа резервних елементів до числа резервованих ними основних елементів пристрою.

Розрізняють резервування з цілою і дробовою кратністю. Кратність резервування будемо позначати m . Наприклад, якщо при резервуванні з цілою кратністю $m = 3$, то це означає, що основний пристрій – один, число резервних пристроїв – три, а загальне число пристроїв дорівнює (три плюс один) чотирьом. Якщо при резервуванні з дробовою кратністю $m = 4 / 2$ (яка виражена неприводимим дробом), то кількість резервних елементів буде дорівнювати чотирьом, число основних – двом, а загальне число елементів буде дорівнювати шести.

Дублювання (duplication) – резервування з кратністю резерву один до одного.

Складовою частиною систем з резервуванням є підсистеми автоматичного контролю працездатності і діагностики несправностей.

1.3.2 Класифікація методів резервування обладнання СРЗ. Архітектурні та технічні рішення, спрямовані на забезпечення надійності функціонування обладнання СРЗ полягають в наступному [29]:

1. Застосування модульного принципу побудови елементів апаратного і програмного забезпечення обладнання, що сприяє використанню різних схем експлуатаційного резервування елементів цього обладнання.

2. Забезпечення підтримки наступних схем резервування обладнання в разі N (need) робочих елементів системи:

– навантажене дублювання ($2N$), коли кожен активний (основний) елемент обладнання має ідентичний запасний елемент, який знаходиться в стані навантаженого резерву (якщо кількість активних елементів дорівнює $N_{\text{осн}}$, то має існувати така ж кількість елементів навантаженого резерву $N_{\text{нав}}$, тобто загальна кількість елементів обладнання $N_{\text{осн}} + N_{\text{нав}}$), приклад такого резервування наведено на рис. 1.4;

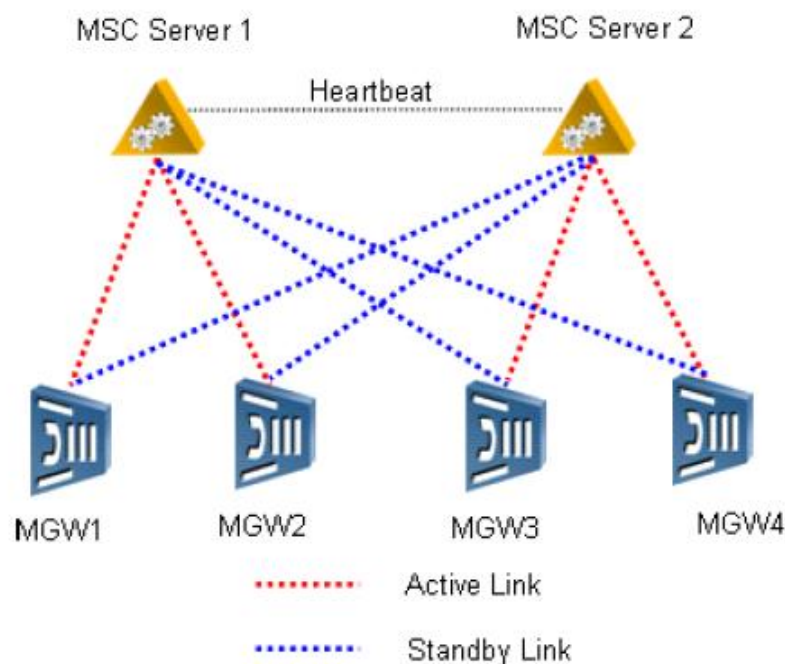


Рис. 1.4. Приклад резервування в СРЗ [29]

– m -кратне ненавантажене резервування (mN), коли для кожного активного елемента обладнання є m ідентичних запасних елементів, які знаходяться в стані ненавантаженого резерву, де $m = 1, 2, \dots$ (якщо кількість активних елементів дорівнює $N_{\text{осн}}$, то має існувати $mN_{\text{осн}}$ елементів ненавантаженого резерву);

– навантажене (гаряче) заміщення ($N_{\text{осн}} + K_{\text{нав}}$), коли на групу з $N_{\text{осн}}$ ідентичних активних елементів існує $K_{\text{нав}}$ додаткових елементів, які знаходяться в стані навантаженого резерву, де $N_{\text{осн}} \geq K_{\text{нав}}$;

– функціонально надмірне забезпечення ($SN_{\text{осн}+}$), коли група з $N_{\text{осн}}$ функціонально надлишкових елементів обладнання функціонує як пул певного функціонального ресурсу, кількість якого в S разів перевищує його номінальну потребу (в цьому випадку, якщо один з елементів обладнання вийде з ладу, то потребу у використанні цього ресурсу задовольняють інші елементи цього пулу).

S – це коефіцієнт функціональної надмірності ресурсного пулу, де $2 \geq S > 1$. Якщо, наприклад, $S = 1,1$, то має місце десятивідсоткова функціональна надлишковість, тобто забезпечено одночасне резервування функціональних можливостей тільки десятої частки від елементів пулу.

– постійне резервування – це паралельне або послідовно-паралельне з'єднання елементів (рис.1.5 та рис.1.6 відповідно) без використання перемикаючих пристроїв; при динамічному резервуванні потрібні перемикаючі пристрої, які реагують на відмови елементів [25].

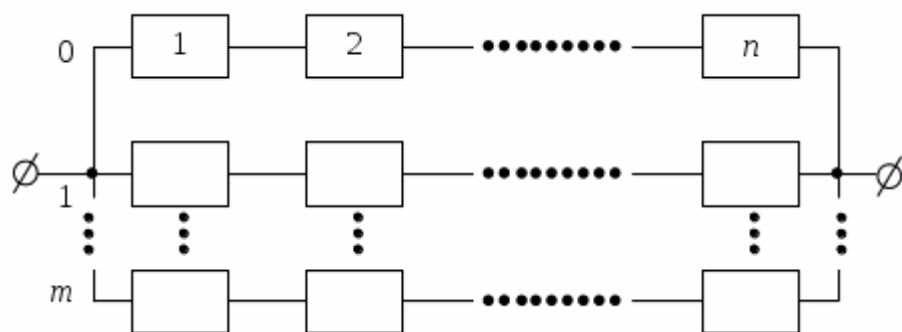


Рис. 1.5. Паралельне включення елементів [25]

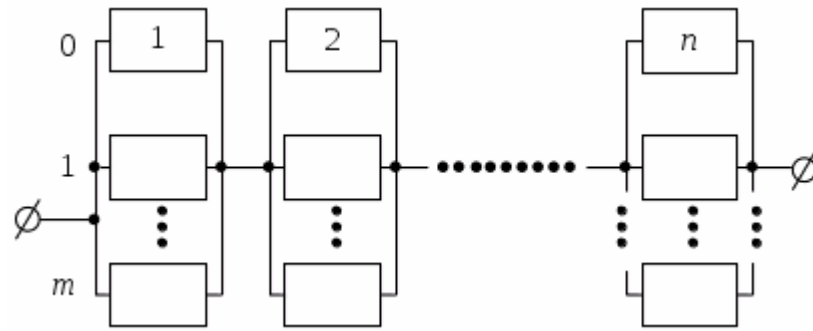


Рис. 1.6. Послідовно-паралельне включення елементів [25]

– резервування мажоритарне – «голосування» n із m елементів (рис. 1.6). Цей спосіб визначається за його принципом – його називають мажоритарним, або логічним, або кворум-елементом. Він дозволяє вести порівняння сигналів, які надходять на мажоритарний елемент (М) від елементів, які виконують одну й ту ж функцію. Якщо результати збігаються, тоді вони передаються на вихід пристрою. На рис. 1.7. зображено резервування за принципом голосування «два з трьох», тобто будь-які два співпадаючих результати з трьох вважаються істинними і проходять на вихід пристрою. Можна застосовувати співвідношення три з п'яти та ін. Головна перевага цього способу – забезпечення підвищення надійності за будь-яких видах відмов працюючих елементів.

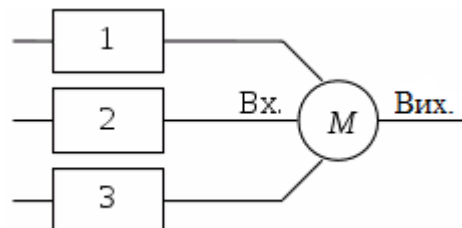


Рис. 1.7. Мажоритарне резервування [25]

Введення додаткового резервування дозволяє підвищити готовність системи, але при цьому потрібні додаткові витрати, оскільки обладнання і програмне забезпечення мають високу вартість.

1.4. Аналіз відомих показників, критеріїв і математичних моделей процесу експлуатації і технічного обслуговування цифрових електронних і радіотехнічних систем.

1.4.1. Відомі технічні показники ефективності процесу експлуатації радіотехнічних систем. Відомі показники ефективності експлуатації СРЗ можна розділити на технічні (ймовірносні) і техніко-економічні (вартісні або часові).

До технічних відносяться комплексні показники надійності: коефіцієнт готовності (КГ), стаціонарний коефіцієнт готовності, коефіцієнт оперативної готовності (КОГ), коефіцієнт технічного використання (КТВ).

До техніко-економічних відносяться показники, які дозволяють визначити залежність між технічними, вартісними і часовими характеристиками СРЗ.

Основними технічними (імовірнісними) показниками є:

1. $R(t_1, t_2)$ – ймовірність безвідмовної роботи обладнання. Визначається відповідно до ДСТУ 2860-94 [14] як ймовірність того, що в межах заданого наробітку відмова обладнання не виникне. Цей показник по радіотехнічному обладнанню не нормується, але може обчислюватися з метою отримання даних про надійність виробів окремих постачальників обладнання.

2. MTBF (Mean Time Between Failures) – середній час напрацювання до відмови. Характеризує рівень надійності устаткування без урахування впливу на надійність цього обладнання процесів технічного обслуговування і ремонту. Визначається відповідно до ДСТУ 2860-94.

3. MTTR (Mean Time To Repair) – середній час відновлення (ремонту) після відмови обладнання. Характеризує рівень досконалості служб технічного обслуговування і ремонту. Визначається відповідно до ДСТУ 2860-94.

4. Максимально допустиме значення MTTR. Цей показник, як правило, нормується.

5. Коефіцієнт готовності – це ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається.

6. Стаціонарний коефіцієнт готовності – це значення КГ, визначене для умов роботи об'єкта, коли середній параметр потоку відмов і середній час відновлення залишаються постійними.

Як зазначалося вище, в сучасних системах до коефіцієнта готовності пред'являються досить жорсткі вимоги. В роботі [Документ SP-3-0092: (Стандарт ТІА-942, редакція 7.0, лютий 2005)] представлено класифікацію систем обробки даних і СРЗ за значеннями КГ, яку наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Класифікація систем обробки даних і СРЗ за значеннями КГ

КГ	Час простою на рік	Тип системи
0,99	3,5 доби	Звичайна (Conventional)
0,999	8,5 год	Високої надійності (High availability)
0,9999	1,0 год	Відмовостійка (Fault resilient)
0,99999	5 хв	Безвідмовна (Fault tolerant)

Так, за даними компанії «Лайфсел», коефіцієнт готовності СРЗ, що експлуатуються, має бути порядку 0,992 – 0,9998, середній наробіток до відмови 61000 год; середній час простою через ТО – 4 год на рік, середній час простою внаслідок відмов – 4,5 год на рік. У той же час, ряд виробників заявляють для свого нового обладнання КГ «п'ять дев'яток» та «шість дев'яток» [28], однак, як показує аналіз статистичних даних на практиці в цілому для великих СРЗ, рівень готовності є значно нижчим. Для його підвищення необхідно або зменшувати час простою через ТО, або вводити апаратну надмірність [28–35].

Із проведеного аналізу випливає, що показники ефективності повинні поряд із характеристиками безвідмовності враховувати не тільки кратність, а й структуру резервування систем. Крім того, показники ефективності резервованих СРЗ повинні бути чутливими до характеристик достовірності експлуатаційного контролю працездатності, а також до забезпеченості запасними виробами.

1.4.2. Аналіз відомих математичних моделей процесу технічної експлуатації цифрових електронних систем і систем радіозв'язку. З огляду на проведений аналіз, готовність СРЗ є одним з найбільш важливих показників їхньої якості та надійності. Тому за останні десятиліття розроблено велику кількість математичних моделей для оцінювання готовності та надійності цифрових

електронних систем та СРЗ, які періодично діагностуються в процесі експлуатації, з різними видами відмов і законами розподілу напрацювань до відмов.

Так, у роботі [36] Т. Накагава проаналізував стратегію проведення періодичного діагностування для виявлення повторювальних відмов. У моделі використано експоненційний закон розподілу часу до повторювальної відмови. Система зв'язку з повторювальними відмовами була розглянута Т. Накагавою в [37]. Час до виникнення відмови підпорядковувався експоненційному закону і відмови були прихованими. Повторювальні відмови ставали явними через певний проміжок часу через зміну стану системи. Й. Хсу і С. Хсу розробили марковську модель, яка складається з трьох станів, для відмовостійких систем з раптовими і повторювальними відмовами [38].

Н. Кранітіс та ін. в роботі [39] провели аналіз надійності оптимального періодичного тестування повторювальних відмов для мінімізації витрат на діагностування. З цією метою було розроблено марковську імовірнісну модель повторювальних відмов. На марковських моделях з трьох станів базувалося дослідження надійності цифрових систем з явними, прихованими і повторювальними відмовами, яке проведене В. Прасадом [40, 41]. С. Дхармарайя розробив аналітичну модель для аналізу надійності і довговічності мережі UMTS, використовуючи марковські ланцюги, напівмарковський процес і експоненційний закон розподілу випадкових величин [42]. Однак вплив прихованих і повторювальних відмов на надійність мережі не був взятий до уваги.

В. Уланський і І. Мачалін в роботі [43] представили модель технічного обслуговування одноклокової системи з періодичним контролем працездатності, з явними і прихованими відмовами і довільним законом розподілу часу до відмови. С. Тагіпур і Д. Баневич розглянули приховані відмови в моделі з оптимальним періодичним контролем для кінцевого й нескінченного інтервалів експлуатації [44]. Х.Аллен і ін. в [45] розробили модель недосконалого технічного обслуговування для максимізації готовності одномодульної системи. С. Константінеску провів аналіз структури апаратного обладнання і виникаючих в ньому відмов, використовуючи безперервну в часі марковську модель з дискретними станами. Отримані вирази

враховують вагові коефіцієнти раптових і поступових відмов [46].

Х. Кім та ін. представили напівмарковську модель для оцінювання достовірності контролю системи з раптовими відмовами в реальному часі. Отримано аналітичні вирази для експоненційного закону і закону Вейбулла розподілу часу до відмови [47]. У роботах [48, 49]. Ф. Бадія та ін. розробили модель технічного обслуговування системи з явними і прихованими відмовами, використовуючи регенеруючий процес. П. Бунятап і Дж. Джатуроннаті представили модель періодичного превентивного обслуговування вживаного обладнання, яке здане в оренду. Однак, в цій моделі не розглядався вплив повторювальних відмов на систему і вона може бути використана тільки для визначення оптимальної періодичності контролю [50].

Х. Фам і Х. Чжан, а також С. Малік та ін. представили узагальнену модель, в якій враховується повнота контролю надійності програмного забезпечення, але не розглядається обладнання цифрових електронних систем [51, 52]. К. Ясуї, Т. Накагава й Г. Сандо представили три стохастичні моделі передачі даних і розглянули оптимальні стратегії обслуговування для досягнення високої надійності зв'язку [53]. А. Раза і В. Уланський розробили математичні моделі надійності безперервно діагностованого змінного блоку авіоніки з постійними і повторювальними відмовами [54, 55]. Однак, ці моделі не можуть бути застосовані для СРЗ, оскільки системи авіоніки, на відміну від СРЗ, експлуатуються в переривчастому режимі роботи.

В роботі [56] Д. Гіль-Тома та ін. розглянули відмовостійку мікрокомп'ютерну систему з повторювальними відмовами. Було представлено марковську модель даної системи та розраховано взаємозалежні функції надійності та безпеки. К. Лі і Х. Хао запропонували модель для розрахунку надійності нової системи з двома залежними характеристиками на основі теорії копули [57]. В роботі [58] В. Уланський і І. Мачалін розглянули основні показники оцінки ефективності експлуатації авіаційних радіоелектронних систем. Було розроблено структурні функції для послідовного і паралельного резервування і наведено математичні вирази для розрахунку комплексних показників надійності і витрат з урахуванням типу резервування.

Однак, у даній роботі розглянуто лише переривчастий характер експлуатації систем і не враховувався вплив повторювальних відмов при розрахунку їхньої готовності.

Проведений аналіз показав, що відомі математичні моделі процесу експлуатації цифрових електронних систем і СРЗ або не враховують вплив повторювальних відмов на надійність і готовність обладнання, або застосовуються лише в разі періодичного контролю його працездатності при 100% повноті контролю. Жоден з авторів не враховує одночасно наявність явних, прихованих і повторювальних відмов в розглянутих системах і обладнанні і безперервного характеру експлуатації і контролю працездатності сучасних СРЗ.

1.4.3 Аналіз відомих техніко-економічних показників оцінювання ефективності систем радіозв'язку. На сьогодні відомі наступні інтегральні показники ефективності інвестицій [59–67]: чистий дохід (Net Value – NV); чистий дисконтований дохід (Net Present Value – NPV); внутрішня норма прибутковості (Internal Rate of Return – IRR); індекси прибутковості витрат та інвестицій; дисконтований термін окупності (Payback Period).

Ці показники є узагальненими і ними доцільно користуватися для оцінювання ефективності інвестицій для всієї компанії радіозв'язку на національному рівні в цілому. У роботах [67–79] показано, що натеper існує більше 50 методик, які використовуються для оцінювання ефективності проектів. Розглянемо найбільш відомі.

Сукупний економічний ефект (Total Economic Impact, TEI) – гетерогенна методика, розроблена компанією Forrester Research. Вона дозволяє оцінити проект впровадження того чи іншого компонента системи з точки зору трьох показників – *«Вартості»*, *«Переваг»* і *«Гнучкості»*.

«Вартість» обчислюється за методикою *«Сукупна вартість володіння»* (TCO) і є єдиною кількісною оцінкою даної методики.

«Переваги» і *«Гнучкість»* оцінюються якісно. *«Переваги»* дозволяють оцінити відповідність можливостей впроваджуваного продукту або компонента системи вимогам проекту впровадження. *«Гнучкість»* розглядається як показник, який характеризує складність процесу впровадження. Очевидно, що методика TEI має

досить вузький спектр застосування. Її можна використовувати для аналізу варіантів впровадження якогось певного компонента інфраструктури підприємства.

Швидке економічне обґрунтування (Rapid Economic Justification, REJ) – методика, розроблена фірмою Microsoft. Встановлює відповідність витрат на ІТ-проект пріоритетам бізнесу. При розробленні методики було поставлено завдання фінансового обґрунтування інвестицій в ІТ. Ключовою ідеєю методики є погляд на ІТ з точки зору бізнес-пріоритетів компанії, стратегічних планів її розвитку і основних фінансових показників (ROI та ін.).

Методика REJ є найбільш складним і комплексним інструментом оцінки проекту впровадження ІТ-рішення. Однак вона не може ефективно оцінювати проекти перетворення ІТ-інфраструктури в цілому.

Інформаційна економіка (Information Economics, ІЕ) є якісним методом оцінювання ІТ-проекту або портфеля проектів. Він передбачає формування переліку критеріїв оцінки ефективності проекту і його аналіз з точки зору потенційних вигод, які реалізація проекту повинна принести для підприємства.

Результатом процесу оцінювання буде рейтинг проекту з точки зору його важливості для основних бізнес-процесів підприємства. У разі застосування методики ІЕ до портфелю проектів або при виборі варіантів реалізації того чи іншого проекту порівняння ІЕ-рейтингів це дасть можливість об'єктивного вибору кращого з варіантів.

Оцінка повернення інвестицій (Return on Investment, ROI) – відрізняється простотою обчислень ефективності витрат, однак не враховує інфляцію та ризики.

Оцінка внутрішньої норми прибутковості (Internal Rate of Return, IRR) – дозволяє враховувати рух грошових коштів, інфляцію, але не враховує ризики.

Оцінка показника бізнесу (Business Value Index, BVI) – дає можливість врахування особливостей ІТ-бізнесу, але спрямована на стратегію побудови бізнесу, а не на фінансові розрахунки.

Сукупна вартість володіння TCO (Total cost of ownership) – сукупна (повна) вартість володіння ресурсів на всіх етапах життєвого циклу [69–72]. Є найбільш поширеним у світовій практиці показником для оцінювання ефективності можливих

рішень і вибору найкращої системи управління ресурсами. Цей показник був розроблений компанією Gartner Group у 80-х роках XX століття. Завдяки фірмі Interpose, заснованій в 1994 році, методика переросла в принципово нову модель аналізу фінансової сторони використання систем.

З метою вдосконалення самої моделі Gartner Consulting (підрозділ Gartner Group) проводила досить трудомісткі дослідження ринку і в результаті співпраці двох компаній запропонована ними методика оцінювання витрат на системи стала поширеним інструментом підрахунку ТСО. Протягом останніх років багатьма компаніями також велися роботи по вивченню проблеми визначення витрат, внаслідок чого з'явилися схожі по суті, але різні за назвою методики і підходи: справжня вартість володіння (Real Cost of Ownership – RCO), сукупна вартість володіння додатками (Total Cost of Application Ownership – TCA) та ін.

Під сукупною вартістю володіння розуміється сума прямих і непрямих витрат, які несе власник системи за період життєвого циклу останньої. Методика оцінки ТСО дозволяє зрозуміти структуру витрат. Всі витрати поділяються на прямі і непрямі.

Прямі (капітальні) витрати – включають в себе усі бухгалтерські витрати, а саме:

- вартість обладнання та програмного забезпечення;
- прямі експлуатаційні витрати;
- заробітну плату співробітників і т. д.

Непрямі витрати – пов'язані з оплатою дій, які безпосередньо не є робочими функціями. До них відносять:

- витрати простоїв системи;
- непрямі експлуатаційні витрати;
- витрати на запобігання ризикам і усунення їхніх наслідків;
- витрати на навчання персоналу і т. п.

При виборі нової системи між альтернативними існуючому рішенню варіантами необхідно оцінити сукупну вартість володіння для кожного запропонованого варіанту.

Крім того, модель ТСО повинна врахувати вплив фактора часу на залучені для проекту грошові кошти (наприклад, за допомогою введення дисконтування).

Однією зі складових для неявних витрат неодмінно будуть експлуатаційні витрати. Значну роль у збільшенні непрямих експлуатаційних витрат відіграють збої в роботі обладнання і ПЗ.

Одним із шляхів зниження ТСО є зниження часу простою. Зниження простоїв навіть на 10–20 % призводить до суттєвої економії бюджету. За оцінками Interpose в абсолютному обчисленні вартість простою може досягати 16 % від загальної вартості володіння (при рекомендованих 4 %).

Серед основних причин зростання часу простою, виключаючи дії кінцевого користувача, виділяються наступні: програмні апгрейди і апдейти – 24,2 %; апаратні апгрейди – 24,0 %; профілактичне обслуговування – 15,2 %; незаплановані відключення електрики – 13,0 %; переконфігурація сервера – 11,5 %; архівування та резервне копіювання – 11,7 %.

У відкритих джерелах наводяться наступні статистичні дані, які дозволяють оцінити час простою для компаній різних сфер діяльності:

- збиток, який наноситься середньому банку через порушення штатного функціонування інфраструктури та інформаційних сервісів, в середньому можна оцінити в 200 тис. дол. США в день;
- як показує аналіз діяльності операторів стільникового зв'язку, одна хвилина простою СРЗ обходиться в середньому в 7 тис. дол. США;
- статистика по ста провідним американським компаніям показує, що кількість зупинок систем становить близько 24 разів на рік при середній тривалості зупинки п'ять годин.

У роботах [68–72] пропонується підхід розрахунку ТСО, при якому витрати розбиваються не на прямі і непрямі, а на капітальні та експлуатаційні. Цей підхід є більш універсальним, оскільки спрощує класифікацію різних видів витрат.

Капітальні витрати (CAPital EXpenditure, CAPEX) – капітал, який використовується компаніями для придбання або модернізації фізичних активів (житлової та промислової нерухомості, обладнання, технологій). Капітальні витрати

являють собою інвестиційну діяльність підприємства, вкладення в покупку устаткування, будівель і споруд, будівництво тощо

Експлуатаційні витрати, або **операційні витрати** (OPEX, OPerational EXpenditure) – повсякденні витрати компанії для ведення бізнесу, виробництва продуктів і послуг.

Розрахунок сукупної вартості володіння в роботі [68] формулюється в наступному вигляді:

$$TCO = OPEX \cdot T + CAPEX, \quad (1.2)$$

де T – період розрахунку сукупної вартості володіння.

Капітальні витрати CAPEX розраховуються на основі врахування вартості обладнання (включаючи його монтаж, конфігурацію і необхідне програмне забезпечення) і споруд за балансовою вартістю.

Експлуатаційні витрати OPEX розраховуються на основі врахування поточних витрат, які можуть бути віднесені до експлуатаційних.

Відзначимо, що методика розрахунку TCO розроблялася як інструмент бюджетування, тому величину TCO, пропоновану в відомих методиках, не можна використовувати без відповідної корекції за наступними причинами:

1. При розрахунках TCO часто враховуються стандартні статті бюджету без оцінки можливих проектних ризиків.

2. Важливе значення має порядок вибору періоду, протягом якого необхідно забезпечити мінімізацію значення TCO. Заходи щодо зниження TCO зводяться до пошуку оптимального співвідношення початкових і почасових витрат. Як правило, високі початкові витрати виправдовуються за рахунок зниження почасових витрат. Чим більше обраний часовий інтервал, тим більшою у TCO є частка почасових витрат і тим більша сума початкових витрат може бути обгрунтована.

3. Не враховуються параметри надійності систем і компонентів, показники достовірності діагностування обладнання та стану системи, що не дозволяє отримати оцінки експлуатаційних витрат.

4. Не враховуються витрати на додаткове резервування блоків, зйомних модулів і на підтримку необхідного обмінного фонду запасних компонентів, які

забезпечують заданий рівень готовності обладнання, що не дозволяє адекватно оцінити необхідні капітальні вкладення на заданому етапі життєвого циклу.

Очевидно, що одним із шляхів зниження експлуатаційних витрат ТСО є резервування обладнання та програмного забезпечення. Однак, збільшення кількості апаратних і програмних засобів вимагає додаткових капітальних вкладень і збільшення прямих експлуатаційних витрат. Тому необхідно розробити комплексний техніко-економічний показник, який буде враховувати перелічені вище чинники.

1.5 Постановка задач дослідження.

Для вирішення основного завдання – забезпечення заданої готовності обладнання СРЗ, необхідно вирішити такі загальні задачі: розробити математичні моделі, які описують процес технічної експлуатації нерезервованого обладнання СРЗ на нескінченному і кінцевому інтервалах часу при довільному законі розподілу напрацювань до явних, прихованих і повторювальних відмов; розробити математичну модель процесу ТО для різних структур резервування обладнання; удосконалити методи оцінювання повних експлуатаційних витрат в періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування з урахуванням видів експлуатаційного резервування; розробити техніко-економічний критерій для вибору прийняттого виду експлуатаційного резервування і кількості запасних модулів обладнання СРЗ.

Із проведеного огляду літератури випливає, що для кожної з перерахованих задач натеper відомий ряд показників і критеріїв оптимізації процесу експлуатації. Однак зазначені критерії не враховують особливостей обладнання СРЗ і особливостей процесу його експлуатації. Крім того, з проведеного аналізу випливає, що моделі, які розробляються, повинні одночасно враховувати особливості процесу безперервного контролю технічного стану блоків і модулів; повноту контролю блоків; вплив явних, прихованих і повторювальних відмов на готовність обладнання СРЗ; витрати на додаткове резервування.

Для забезпечення заданого рівня готовності необхідно використовувати експлуатаційне резервування вцілому та окремих модулів обладнання СРЗ. Тому

необхідна методика для оцінювання рівня готовності обладнання при різних видах резервування. Збільшення кількості резервованого обладнання з одного боку дозволяє підвищити його готовність, а з іншого боку вимагає додаткових фінансових витрат. Тому необхідно розробити техніко-економічний показник, який дозволить оптимізувати кратність резервування обладнання і експлуатаційні витрати.

Таким чином, на основі виконаного огляду і аналізу, можна сформулювати такі наукові завдання дисертаційної роботи:

- провести аналіз обладнання СРЗ з точки зору надійності та контролепридатності; провести класифікацію методів і видів резервування обладнання СРЗ; провести аналіз відомих математичних моделей процесу експлуатації і ТО та техніко-економічних показників оцінки ефективності експлуатації обладнання СРЗ;

- розробити математичні моделі процесу ТО нерезервованого обладнання СРЗ, яке охоплене безперервним контролем працездатності, за різної повноти контролю на нескінченному інтервалі експлуатації з урахуванням впливу явних, прихованих і повторювальних відмов, а також для випадку проведення повного додаткового контролю працездатності (ПДКП);

- розробити математичну модель процесу ТО нерезервованого обладнання СРЗ, яке охоплене безперервним контролем працездатності, на кінцевому інтервалі експлуатації з урахуванням впливу явних, прихованих і повторювальних відмов, а також повноти контролю;

- розробити математичну модель ТО резервованого обладнання СРЗ, яка дозволить оцінювати значення коефіцієнта готовності обладнання для різних структур резервування;

- удосконалити методи оцінювання повних експлуатаційних витрат обладнання СРЗ в періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування з урахуванням видів експлуатаційного резервування, які дозволять визначати прийнятний варіант експлуатаційного резервування і кількості запасних модулів при максимумі коефіцієнта готовності та обмеженні на експлуатаційні

витрати або при обмеженні на коефіцієнт готовності та мінімумі експлуатаційних витрат;

- розробити імітаційний алгоритм і програму статистичного моделювання процесу технічної експлуатації СРЗ, що дозволить моделювати і оцінювати основні параметри процесу ТО

- розробити методики і програмне забезпечення для оцінювання основних показників ефективності процесу ТО та оптимізації системи ТО обладнання СРЗ.

1.6. Висновки.

1. Проведено аналіз основних характеристик і особливостей побудови сучасних СРЗ. Із аналізу систем випливає:

- системи радіозв'язку складаються з великої номенклатури обладнання; обладнання використовує цифровий спосіб обробки інформації та комутації;

- всі системи охоплені безперервним контролем технічного стану;

- системи контролю та тестування можуть мати різну повноту контролю, від величини якої буде залежати правильне прийняття рішення про стан виробів;

- сучасному обладнанню СРЗ притаманні явні, приховані, і повторювальні відмови.

Отже, математичні моделі, які розробляються, повинні враховувати: особливості процесу безперервного контролю технічного стану блоків і модулів; повноту контролю працездатності; вплив явних, прихованих і повторювальних відмов на готовність обладнання.

2. Проведено аналіз і виконано класифікацію основних видів резервування обладнання СРЗ. Показано, що введення додаткового резервування дозволяє підвищити готовність системи, але при цьому потрібні додаткові витрати.

3. Проаналізовано відомі технічні показники ефективності процесу експлуатації систем радіозв'язку. Із проведеного аналізу випливає, що показники ефективності повинні поряд з характеристиками безвідмовності враховувати не тільки кратність, а й структуру резервування систем. Крім того, показники ефективності резервованого обладнання СРЗ повинні бути чутливі до характеристик

достовірності експлуатаційного контролю працездатності та до достатності системи забезпечення запасів.

4. Проведено аналіз відомих математичних моделей процесу технічної експлуатації цифрових електронних систем і СРЗ, який показав, що відомі математичні моделі не враховують вплив повторювальних відмов на надійність і готовність обладнання, а також застосовуються тільки в разі періодичного контролю його працездатності при 100% повноті контролю. Жоден з авторів не враховує одночасно наявність явних, прихованих і повторювальних відмов в розглянутих системах і обладнанні та безперервного характеру експлуатації і контролю працездатності сучасних СРЗ.

5. Виконано аналіз відомих техніко-економічних показників оцінювання ефективності СРЗ. Показано, що відомі показники не враховують параметри надійності систем і компонентів, показники достовірності діагностування обладнання, що не дозволяє отримати достовірну оцінку експлуатаційних витрат. Не враховуються також витрати на додаткове резервування блоків, зйомних модулів і на підтримку необхідного обмінного фонду запасних компонентів, які забезпечують заданий рівень готовності обладнання, що не дозволяє адекватно оцінити необхідні капітальні вкладення на заданому етапі життєвого циклу. Таким чином, необхідно удосконалити методи оцінювання повних експлуатаційних витрат у періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування у такій спосіб, щоб вони дозволяли врахувати перераховані вище складові.

6. Наведено постановку завдань дослідження дисертації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ITU-T Recommendation G. 1000 (11/2001). Communication Quality of Service. A framework and definitions. – 34 p.
2. Гордеев Д. Надежность прежде всего. – Журнал сетевых решений. – 2008. – №12. – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osp.ru/lan/2008/12/5808018/> (дата звернення: 20.04.2014).
3. Нетес В. А. Надежность сетей связи в период перехода к NGN. – Вестник связи. – 2007. – № 9. – С. 1–8.
4. Как устроена сеть сотовой связи GSM/UMTS. [Электронный ресурс]. URL: <https://geektimes.ru/post/82757/> (дата звернення: 20.05.15).
5. ITU-T. 3G Release 99 -Technical Specifications and Technical Reports for a UTRAN-based 3GPP system, TR 21.101. – 18 p.
6. ITU-T. 3G: Release 4 –Release 7 - Technical Specifications and Technical Reports for a UTRAN-based 3GPP system, TR 21.101. – 19 p.
7. Вишневский В. М., С. Л. Портной, И. В. Шахнович. Энциклопедия WiMAX: Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.
8. Терентьева І. Є. Структуризація та оцінювання готовності резервованого обладнання системи наземного радіодоступу UTRAN. Радиоелектроника и информатика. – 2015. - № 3. – С. 3–8.
9. Степутин А. Н., Николаев А. Д. и др. Принципы построения и функционирования сетей LTE / Портал о современных технологиях мобильной и беспроводной связи. – [Электронный ресурс]. URL: <http://1234g.ru/4g/lte/printsiy-raboty-seti-lte/printsiyu-postroeniya-i-funktsionirovaniya-setej-lte> (дата звернення: 20.05.15).
10. Одарченко Р. С., Терентьева І. Є., Гнап Р. В., Михайленко К. О. Дослідження перспективних технологічних рішень для стільникових мереж сімейства стандартів 5G. Стандартизація, сертифікація, якість. – К., 2016. – № 6(103). – С. 14-19.
11. Габрусенко Е. И., Тараненко А. Г., Терентьева И. Е. Методы формирования и оценки параметров кластера в сотовых системах мобильной связи.

Водний транспорт. Збірник наукових праць Київської державної академії водного транспорту ім. гетьмана П. Конашевича-Сагайдачного. – К.: КДАВТ, 2014. – № 3(21). – С. 31–36.

12. Мачалин И. А., Андрухович П. А., Пузыренко А. Ю., Терентьева И. Е. Оценка уровня утечки информации за счет побочного электромагнитного излучения. *Захист інформації*. –2013. – № 2. – С. 159–164.

13. Габрусенко Е. И., Тараненко А. Г., Терентьева И. Е. Метод пространственного мультиплексирования данных в системах сотовой связи. *Современные средства связи. XXI Міжнар. наук.-техн. конф., 20–21 жовтня 2016р.:* тези доп. – Мінськ, Республика Білорусь. – С. 47–48.

14. ДСТУ 2860–94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Держстандарт України. – Київ, 1995. – 36 с.

15. Бакланов И. Г. Методы измерений в системах связи. – М.: Эко-Трендз, 1999. – 289 с.

16. Osherove R. *The Art of Unit Testing with Examples in .NET.* – Manning. – 2009, 320 p.

17. U-SYS SoftX3000. Electronic Documentation. Huawei Technologies Co., Ltd. [Электронний ресурс]. URL: <http://carrier.huawei.com/en/products/fixed-network>. (дата звернення: 01.09.2015).

18. UA5000 Electronic Documentation. Huawei Technologies Co., Ltd. [Электронний ресурс]. URL: <http://carrier.huawei.com/en/products/fixed-network>. (дата звернення: 01.09.2015).

19. BSC6900 Technical Description / Huawei Technologies Co., Ltd. – 2010. – 113 p.

20. OSTA 2.0 XCBF Switch Board V200R006C02 Configuration Guide-Network Management / Huawei Technologies Co., Ltd. – 2012. – 120 p.

21. Росляков А. В., Крылов П. С. Принципы построения, применения и проектирования оборудования коммуникационной платформы U-SYS/ Под ред. А.В. Рослякова. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2013. – 108 с.

22. Haiyu Qi, Sanka Ganesan, I. Michael. No-fault-found and intermittent failures

in electronic products. - *Microelectronics Reliability* 48 (2008) pp. 663–674.

23. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.

24. Ушаков И. А. Курс теории надежности систем. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.

25. Беляев Ю. К., Богатырев В. А., Болотин В. В. и др. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь. – 1985 – 643 с.

26. Трибунский Д. С., Тимченко С. В. Алгоритм вычисления среднего времени восстановления связи / Вычислительные и сетевые ресурсы. – 2010. – №1. – С.10-14.

27. Егунов М. М. Анализ структурной надёжности транспортной сети / Вестник СибГУТИ. – 2012. – №1. – С.54–59.

28. Куперман М., Аверьянов Д., Правда «пяти девяток». – ИКС-Медиа. – 2010. – №6. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iksmedia.ru/articles/3320243-Pravda-ryati-devyatok.html> (дата звернения: 25.05.16).

29. MSoftx3000 V200R008 Mobile Softswitch Center Product Description, issue V1.0 (2009-05-15). [Электронный ресурс] URL: <https://fccid.io/ANATEL/02683-09-03257/Manual/3FB147AC-F815-47D9-9CC0-05EA9FCF0A78> (дата звернения: 25.05.16).

30. Бычков В. Определение доступности IT- услуги. Смарт Сорсинг: Теория: методики и стандарты. [Электронный ресурс] URL: http://smartsourcing.ru/blogs/teoriya_metodiki_i_standarty/2210 (дата звернения: 25.05.16).

31. Одом Ш., Ноттингем Х. Маршрутизаторы CISCO. – М.: Кудиц-Образ, 2003. – 528 с.

32. Ayers M. L., *Telecommunications system reliability engineering, theory, and practice*. New Jersey: Wiley, 2012. – 496 p.

33. Chan P., Lyu M., Malek M. Making Services Fault Tolerant // *Service Availability: Third International Service Availability Symposium, ISAS 2006, Helsinki, Finland, May 15-16, 2006 : Revised Selected Papers. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 4328. – Berlin Heidelberg: Springer, 2006. – pp. 43–61.

34. Ayers M. L., Telecommunications system reliability engineering, theory, and practice. – New Jersey: Wiley, 2012. – 342 p.
35. Olifer N., Olifer V. Computer networks: principles, technologies and protocols for network design. – Chichester: Wiley, 2005. – 643 p.
36. Nakagava T. Maintenance theory of reliability. – London: Springer, 2005. – 276 p.
37. Nakagava T. Advanced reliability models and maintenance policies. – London: Springer, 2008. – 379 p.
38. Hsu Y. T., Hsu C. F. Novel model of intermittent faults for reliability and safety measures in long-life computer systems. – Int Journal of Electronics. – 1991. – Vol. 71(6) – pp. 917–937.
39. Kranitis N., Merentitis A., 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. – 2006. – pp. 1–6.
40. Prasad V. B. Computer networks reliability evaluations and intermittent faults. Proc. of 1990 IEEE 33th Midwest Symp on Circuits and Systems. – Calgary, Alta. –1990.– – Vol. 1. – pp. 327–330.
41. Prasad V. B. Digital systems with intermittent faults and Markovian models. Proc. of 1992 IEEE 35th Midwest Symp on Circuits and Systems. – Washington. – 1992. – Vol. 1. – pp. 195–198.
42. Dharmaraja S., Jindal V., Varshney U. Reliability and survivability analysis for UMTS network: an analytical approach. – Network and service management, IEEE transactions. – 2008. – Vol. 5. – pp. 132–142.
43. Ulansky V. V., Machalin I. A. Maintenance policy of one-unit system with revealed and unrevealed failures. – Mathematical machines and systems. – 2007.–.Vol. 34. – pp. 245–256.
44. Taghipour S., Banjevic D. Periodic inspection optimization models for a repairable system subject to hidden failures. – Reliability, IEEE Trans. – 2011. – Vol. 60(1). – pp. 275–285.

45. Allen H. T., Ling-Yau C., Yongdao Z., Haitao L., Elsayed E. A. Condition based maintenance of periodically inspected systems. – Lecture Notes in Engineering and Computer Science: World Congress on Engineering – 2009. – Vol. II. – pp. 1256–1261.

46. Constantinescu C. A. Decomposition method for reliability analysis of real-time computing systems. – Proc. of Reliability and maintainability Symposium. – Anaheim, CA. – 1994. – pp. 272–277.

47. Kim H., White A. L., Shin K. G. Reliability modeling of hard real-time systems –Proc. of Fault-Tolerant Computing, Twenty-Eight Annual Int. Symposium. –. Munich. – 1998 – pp. 304–313.

48. Badia F. G., Berrade M. D. Optimum maintenance of a system under two types of failure. – Int. Journal of Materials & Structural Reliability.– 2006. – Vol. 4(1). – pp. 27–37.

49. Badia F. G., Berrade M. D., Campos C. A. Optimal inspection and preventive maintenance of units with revealed and unrevealed failures. – Reliability Engineering and System Safety. – 2002. – Vol. 78. – pp. 157–163.

50. Boonyathap P., Jaturonnatee J. Multiple periodic preventive maintenance for used equipment under lease. – Lecture Notes in Eng. and Computer Science: Int. Multiconference of Engineers and Computer Scientist . – 2010. – Vol. III. – pp. 1852–1857.

51. Pham H., Zhang X. NHPP software reliability and cost models with testing coverage – European Journal of Operational Research. – 2003. – Vol. 145. – pp. 443–454.

52. Mallik S., Kaizer F. A Study of the Reliability of Electronic Telecommunication Systems Working at Subsea Level. – Transactions on Engineering Technologies (WCE 2014). – G. Yang, S. Ao, L. Gelman, Eds. Springer. – 2014. – pp. 35–80.

53. Yasui K., Nakagava T., Sandoh H. Reliability models in data communication systems – Stochastic Models in Reliability and Maintenance. Osaki S., Ed. Springer. , 2002. – pp. 281–306.

54. Raza A., Ulansky V. Minimizing total lifecycle expected costs of digital avionics' maintenance. – Procedia CIRP, Elsevier. – 2015. – Vol. 38. – pp. 118–123.

55. Raza A., Ulansky V. Modelling of operational reliability and maintenance cost for avionics systems with permanent and intermittent failures. – Proc. of the 9th IMA Int. Conf. on Modelling in Ind. Maintenance and Reliability. – London, UK – 2016. – pp. 186–192.
56. Gil-Tomás D., Gracia-Morán J., Baraza-Calvo J. C, Saiz-Adalid L. J., Gil-Vicente P.J. Injecting intermittent faults for the dependability assessment of a fault-tolerant microcomputer system. – IEEE Transactions on Reliability. 2016. – Vol. 65(2). – pp. 648–661.
57. Li C., Hao H. A copula-based degradation modeling and reliability assessment. – Eng. Letters – Vol. 24(3). – pp. 295–300.
58. Уланский В. В, Мачалин И. А. Показатели эффективности эксплуатации резервированных авиационных радиоэлектронных систем. – Математические машины и системы. – 2006. –№4. – С.155–163.
59. Бланк, И. А. Управление инвестициями предприятия / И. А. Бланк. – К.: Эльга, 2003. – 469 с.
60. Боди, З. Принципы инвестиций. – М.: Вильямс, 2008. – 982 с.
61. Баумоль Б. Секреты экономических показателей. Скрытые ключи к будущим экономическим тенденциям и инвестиционным возможностям / Б. Баумоль; А.В. Григораш (науч.ред.), Теплых О.В. (пер.). – Донецк: Баланс Бизнес Букс, 2007. – 352 с.
62. Заика, И. Л. Проблемы инвестиций в национальной экономике (на примере воздушного и морского транспорта). – М.: Компания Спутник+, 2008. – 384 с.
63. Мищенко А. В. Методы управления инвестициями в логистических системах. – М.: ИНФРА–М, 2009. – 362 с.
64. Сироткин, С. А. Экономическая оценка инвестиционных проектов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ, 2009. – 287 с.
65. Касимов, Ю. Ф. Финансы и инвестиции. – М.: Анкил, 2008. – 231 с.
66. Глухов, В. В. Выбор стратегий промышленного предприятия. – СПб.: Северная звезда, 2002. – 246 с.

67. Царев, В. В., Каблуков В. В. Оценка экономической эффективности бизнеспроектов на основе многоцелевой оптимизации . – СПб.: Питер, 2000. – 274 с.
68. Филиппова И, Соколова А. Косвенные расходы при оценке ТСО. Директор информационной службы – 2008. - № 10. - [Электронный ресурс] URL: <http://www.osp.ru/cio/2008/10/5337671/> (дата звернения: 25.05.16).
69. Мартынович А. ТСО, или как управлять IT-затратами / Компьютерное обозрение. – 2010. – №2. – [Электронный ресурс] URL: <http://www.management.com.ua/ims/ims023.html> (дата звернения: 25.05.16).
70. TCO Analyst. A White Paper on GartnerGroup's Next Generation Total Cost of Ownership Methodology// Gartner Consulting. - Stamford: CT, 1997. [Электронный ресурс] URL: <http://www-tus.csx.cam.ac.uk/techlink/workshops/atlantic/atlantic2.pdf> (дата звернения: 25.05.16).
71. Koomey J., Kenneth G., A Simple Model for Determining True Total Cost of Ownership for Data Centers – The Uptime Institute, 2007. – pp.654–671.
72. Пример оценки полной стоимости владения (ТСО) корпоративным ЦОД / Технологии и средства связи. – 2012. – №3. Электронный ресурс]. URL: <http://www.tssonline.ru/articles2/data-centers/primer-otsenki-polnoy-stoimosti-vladieniya-%28tso%29-korporativnym-tsod.6> (дата звернения: 25.05.16).
73. Волков И. Оценка эффективности информационных систем: Часть 3. Пример расчета эффективности использования ИС методом ТЕІ. Электронный ресурс]. URL: http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/1-otcenka_efektivnosti_3/index.html#author1 (дата звернения: 25.05.16).
74. Щетинин И. Стоимость владения и системы управления / Открытые системы. – 2005. – №9. [Электронный ресурс] URL: <http://www.i-teco.ru/article60.html> (дата звернения: 25.05.16).
75. Тарасенко П. Расчет и распределение затрат/ Экономика бизнеса. – 2010. – №46. – [Электронный ресурс] URL: <http://www.eg-online.ru/article/52214/> (дата звернения: 02.06.16).

76. Козлов М. Считаем стоимость владения (ТСО) для систем Enterprise Content Management (ECM) на примере Alfresco – [Электронный ресурс] URL: <http://www.devbusiness.ru/mkozloff/2010/05/11/> (дата звернення: 02.06.16).

77. Дамодаран А. Инвестиционная оценка: Инструменты и методы оценки любых активов = Investment valuation. Tools and techniques for determining the value of any asset. – М.: Альпина Паблишерз. – 2010. – С.1338-1342.

78. Williams Jan R., Нака S. F., Bettner M. S, Carcello J. V. Financial & Managerial Accounting. – Irwin Professional Pub. – 2006. – 384 p.

79. Минухин С. В. Методика выбора и расчет затрат совокупной стоимости владения вычислительным кластером. – Радиозлектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – №1(49). – С. 90–96.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ

ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НЕРЕЗЕРВОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

2.1. Постановка завдань.

Розроблення математичних моделей процесу технічного обслуговування обладнання систем радіозв'язку (СРЗ) необхідно проводити на основі аналізу видів відмов, які властиві даним системам, а також з урахуванням повноти контролю (тестування).

В сучасних СРЗ використовується цифрова обробка інформації. Аналіз методів контролю працездатності цифрових СРЗ показав, що інтервали між проводимими періодичними контролюями настільки малі, що ними можна знехтувати [1, 2], тому будемо вважати, що такі системи охоплені безперервним контролем працездатності з кінцевою повнотою тестування.

Проведений в розділі 1 аналіз існуючих видів відмов показав, що для цифрових СРЗ характерні наступні види відмов: за характером усунення – сталі та повторювальні відмови; за характером зміни основних параметрів – раптові та поступові відмови; за можливістю виявлення – явні та приховані відмови. Явні відмови відбуваються в тій частині обладнання, яка охоплена постійним контролем, тоді як приховані відмови відбуваються в тій частині обладнання, яка не охоплена контролем. Повторювальні відмови виявляються безперервним контролем або повним додатковим контролем [3]. Поступові відмови проявляють себе при тривалій експлуатації систем і є наслідком деградації параметрів компонентів обладнання СРЗ [4, 5].

Як показано в розділі 1, найважливішим показником ефективності процесу експлуатації СРЗ є коефіцієнт готовності. Проте, на теперішній час відсутні математичні моделі процесу ТО для оцінювання коефіцієнта готовності, які дозволяють врахувати усі види відмов, перераховані вище. Тому завданнями даного розділу є розроблення математичних моделей, які дозволять оцінити середній час

знаходження нерезервованих зйомних модулів (ЗМ) СРЗ в різних станах працездатності та технічного обслуговування, а також отримати вирази для розрахунку коефіцієнта готовності модулів СРЗ з урахуванням видів відмов, повноти контролю, а також з урахуванням деградації параметрів компонентів обладнання.

У процесі експлуатації обладнання СРЗ після фіксації відмови, як правило, виконується повний додатковий контроль працездатності (ПДКП), або повне тестування [6], тому математичні моделі, які розробляються, повинні також враховувати вплив на коефіцієнт готовності ПДКП.

2.2 Математична модель ТО нерезервованого зйомного модуля СРЗ (Модель 1).

2.2.1. Математична модель ТО СРЗ при довільному законі розподілу напрацювання зйомного модуля до відмови на нескінченному інтервалі часу. Для розроблення Моделі 1 процесу ТО нерезервованого ЗМ СРЗ введемо такі припущення і обмеження:

1. Зйомний модуль є елементом системи радіозв'язку, яка охоплена неповним безперервним контролем, тобто є контрольована і неконтрольована частини.

2. В ЗМ можуть виникати явні відмови в контрольованій частині та приховані відмови в неконтрольованій частині модуля, причому в одиницю часу відбувається тільки одна відмова.

3. В ЗМ можуть виникати повторювальні відмови, які призводять до відключення працездатного модуля. Повторювальна відмова виявляється тільки після проведення додаткових операцій з контролю працездатності ЗМ, тобто в процесі відновлення внаслідок повторювальної відмови.

4. Прихована відмова виявляється в процесі відновлення, яке обумовлене появою явної або повторювальної відмови.

5. Зйомні модулі є нерезервованими. За відмови модуля миттєво відбувається його заміна на працездатний ЗМ, при цьому кількість запасних модулів не обмежена.

6. На інтервалі технічної експлуатації $(0, \infty)$ час відновлення ЗМ на багато менше часу напрацювання до відмови.

Процес ТО ЗМ будемо розглядати на нескінченному інтервалі часу у вигляді послідовності зміни різних станів ЗМ, які будемо описувати випадковим процесом $Z(t)$ з кінцевим простором станів $Z = \bigcup_{i=1}^n Z_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). В процесі ТО, в залежності від технічного стану ЗМ та при різних видах відмов, зйомний модуль може стрибкоподібно переходити в один із можливих станів [7–9].

Припустимо, що процес $Z(t)$ є регенеруючим випадковим процесом. Як показано в роботі [9], такий процес має властивість завжди повертатися в точку регенерації. Починаючи з цієї точки подальший розвиток процесу не залежить від його поведінки в минулому і є ймовірнісною копією процесу $Z(t)$, який почався в момент $t = 0$.

Для опису процесу переходів ЗМ у різні стани введемо такі позначення:

$\Gamma (\Gamma \geq 0)$ – випадкова величина, яка характеризує напрацювання до явної відмови;

$\Xi (\Xi \geq 0)$ – випадкова величина, яка характеризує напрацювання до прихованої відмови;

$H (H \geq 0)$ – випадкова величина, яка характеризує напрацювання до повторювальної відмови;

$t = \gamma_i, i = 1, 2, 3, \dots$ – моменти часу настання явної відмови;

$t = \xi_i, i = 1, 2, 3, \dots$ – моменти часу настання прихованої відмови;

$t = \eta_i, i = 1, 2, 3, \dots$ – моменти часу настання повторювальної відмови.

Процес переходів з одного стану в інший наведено на діаграмі (рис.2.1).

Випадковий процес $Z(t)$ описується чотирма різними станами, в одному з яких може перебувати ЗМ в довільний момент часу t :

$Z(t) = Z_1$, якщо в момент t ЗМ знаходився в працездатному стані;

$Z(t) = Z_2$, якщо в момент t ЗМ знаходився в непрацездатному стані, але продовжував виконувати свої функції, внаслідок того що сталася прихована відмова в неконтрольованій частині ЗМ;

$Z(t) = Z_3$, якщо в момент t ЗМ знаходився в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови;

$Z(t) = Z_4$, якщо в момент t модуль знаходився в стані відновлення внаслідок явної відмови.

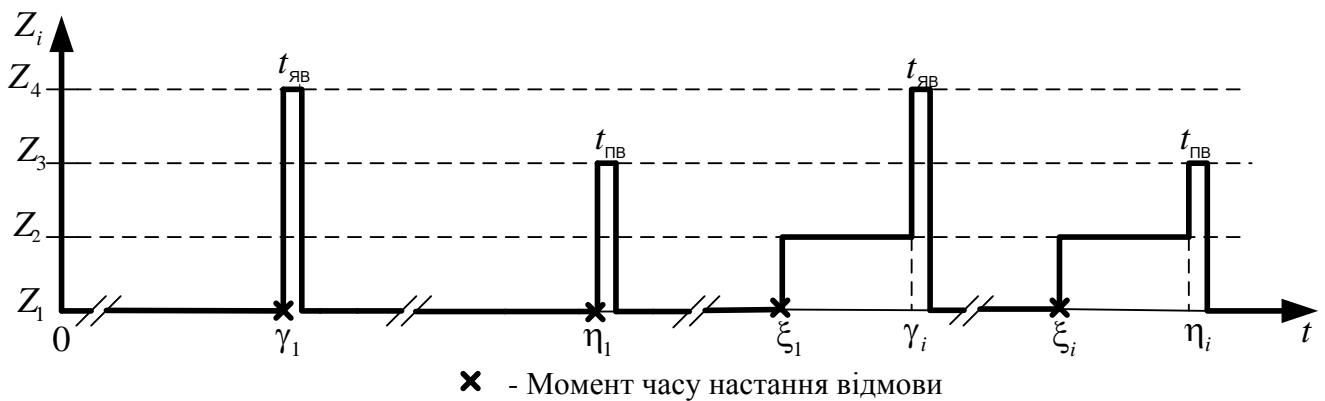


Рис. 2.1. Часова діаграма регенеруючого процесу ТО ЗМ

Як показано на рис. 2.1, від початкового моменту $t = 0$ використання ЗМ за призначенням і до настання однієї з відмов модуль буде перебувати в працездатному стані.

Припустимо, що в момент часу γ_i відбудеться явна відмова в контрольованій частині модуля, яка виявиться засобами вбудованого контролю, тоді ЗМ буде визнаний непрацездатним і перейде в стан відновлення Z_4 , тривалість якого позначимо $t_{яв}$. Після завершення операцій по відновленню ЗМ повернеться в працездатний стан Z_1 .

Далі припустимо, що в якийсь момент часу η_i в ЗМ відбудеться повторювальна відмова. В результаті модуль перейде в стан Z_3 , який триватиме протягом часу $t_{пв}$. Після відновлення ЗМ перейде в працездатний стан Z_1 .

Далі припустимо, що в довільний момент часу ξ_i в ЗМ відбудеться прихована відмова в неконтрольованій частині ЗМ, тоді модуль перейде в непрацездатний стан Z_2 , з якого він може перейти або в стан Z_3 , або в Z_4 .

Нехай T_i – випадковий час знаходження ЗМ в стані Z_i ($i = \overline{1, 4}$) за випадковий цикл регенерації T_0 ; $M[T_i]$ – середнє значення T_i за середній цикл регенерації $M[T_0]$. Оскільки справедливо співвідношення

$$T_0 = \sum_{i=1}^4 T_i,$$

то використовуючи теорему додавання математичних сподівань (МС), отримуємо

$$M[T_0] = \sum_{i=1}^4 M[T_i]. \quad (2.1)$$

Отже, коефіцієнт готовності ЗМ визначається за формулою

$$K_{\Gamma} = \frac{M[T_1]}{M[T_0]}. \quad (2.2)$$

Таким чином, для розрахунку коефіцієнта готовності [10, 11] необхідно визначити значення математичних сподівань $M[T_1], \dots, M[T_4]$ часу знаходження ЗМ в кожному зі станів Z_1, \dots, Z_4 .

Для визначення $M[T_1], \dots, M[T_4]$ введемо такі позначення:

$\Phi(t)$ – функція розподілу (ФР) напрацювання до явної відмови в частині ЗМ, яка охоплена контролем;

$\varphi(t)$ – щільність розподілу ймовірностей напрацювання до явної відмови в частині ЗМ, яка охоплена контролем;

$F(t)$ – ФР напрацювання до прихованої відмови в неконтрольованій частині ЗМ;

$f(t)$ – щільність розподілу ймовірностей напрацювання до прихованої відмови в неконтрольованій частині ЗМ;

$\Psi(t)$ – ФР розподілу напрацювання до повторювальної відмови в частині ЗМ, яка охоплена контролем;

$\psi(t)$ – щільність розподілу ймовірностей напрацювання до повторювальної відмови в частині ЗМ, яка охоплена контролем.

Середній час знаходження ЗМ в кожному зі станів будемо визначати за формулою повного математичного сподівання випадкової величини [12].

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в працездатному стані. Розглянемо часові діаграми процесу ТО при настанні явної, прихованої та повторювальної відмов (рис.2.2). Нехай в момент часу ξ ($0 < \xi \leq \infty$) відбудеться прихована відмова. Тоді, згідно з прийнятим обмеженням, ЗМ буде в працездатному стані до виникнення явної відмови в момент $\gamma < \xi$ (рис.2.2, а) або повторювальної відмови в момент $\eta < \xi$ (рис.2.2, б) відповідно. Також ЗМ буде працездатним до моменту ξ виникнення прихованої відмови за умови, що до неї не було явної та повторювальної відмов (рис.2.2, в).

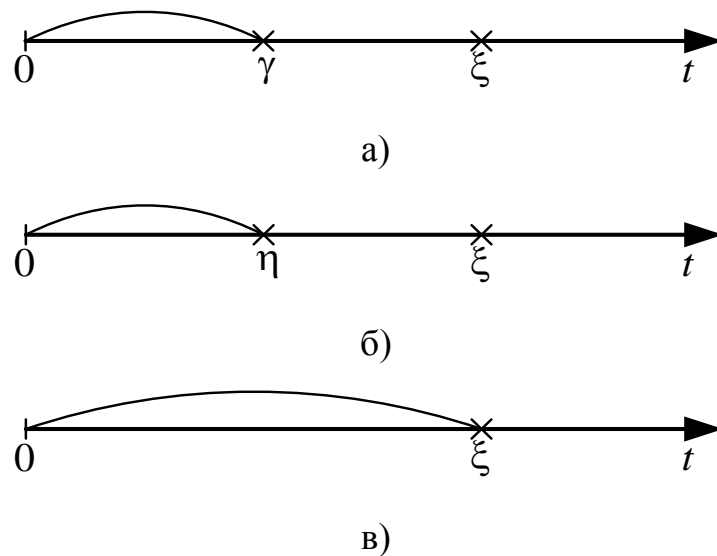


Рис. 2.2. Часові діаграми процесу ТО при настанні явної відмови (а), прихованої відмови (б) та повторювальної відмови (в)

Тоді середній час знаходження модуля в працездатному стані можна визначити за формулою повного МС неперервної випадкової величини

$$M[T_1] = \int_0^{\infty} \left\{ M[T_1^\gamma | \Xi = \xi] + M[T_1^\eta | \Xi = \xi] + M[T_1^\xi | \Xi = \xi] \right\} dF(\xi), \quad (2.3)$$

де $M[T_1^\gamma | \Xi = \xi]$ – умовне МС випадкового напрацювання до явної відмови за умови, що $\Xi = \xi$; $M[T_1^\eta | \Xi = \xi]$ – умовне МС випадкового напрацювання до повторювальної відмови за умови, що $\Xi = \xi$; $M[T_1^\xi | \Xi = \xi]$ – умовне МС випадкового напрацювання до прихованої відмови за умови, що $\Xi = \xi$.

Для визначення умовних МС, які входять у формулу (2.3), скористаємося відомою властивістю умовного МС [13]

$$M[X | X = x] = x, \quad (2.4)$$

де X – неперервна випадкова величина; x – деяке значення випадкової величини X .

Використовуючи часові діаграми, які показані на рис. 2.2, і формулу (2.4), визначаємо вирази для умовних МС:

$$M[T_1^\gamma | (\Xi = \xi) \cap (\Gamma = \gamma < \xi) \cap (H > \gamma)] = \gamma, \quad (2.5)$$

$$M[T_1^\eta | (\Xi = \xi) \cap (H = \eta < \xi) \cap (\Gamma > \eta)] = \eta, \quad (2.6)$$

$$M[T_1^\xi | (\Xi = \xi) \cap (\Gamma > \xi) \cap (H > \xi)] = \xi. \quad (2.7)$$

Використовуючи формули (2.5) – (2.7), визначимо умовні МС, які входять у вираз (2.3).

Із умови $\Gamma = \gamma < \xi$ у формулі (2.5) випливає, що випадкова величина Γ може приймати значення від 0 до ξ . Умова $H > \gamma$ вказує на те, що до моменту $\Gamma = \gamma$ явної відмови з ймовірністю $P(H > \gamma) = 1 - \Psi(\gamma)$ не відбудеться повторювальна відмова. Тому, позбавляючись від інших умов в (2.5), отримуємо

$$M[T_1^\gamma | \Xi = \xi] = \int_0^\xi u [1 - \Psi(u)] d\Phi(u). \quad (2.8)$$

Аналогічно, з умови $H = \eta < \xi$ у формулі (2.6) випливає, що випадкова величина H може приймати значення від 0 до ξ , а умова $\Gamma > \eta$ вказує на те, що до моменту $H = \eta$ повторювальної відмови з ймовірністю $P(\Gamma > \eta) = 1 - \Phi(\eta)$ не відбудеться явна відмова. Отже,

$$M[T_1^\eta | \Xi = \xi] = \int_0^\xi x[1 - \Phi(x)]d\Psi(x). \quad (2.9)$$

Умови $\Gamma > \xi \cap H > \xi$ у формулі (2.7) вказують на те, що прихована відмова в момент ξ може відбутися тільки у тому випадку, якщо до цього моменту не було явної і повторювальної відмов. Імовірність такої події дорівнює $P(\Gamma > \xi \cap H > \xi) = [1 - \Phi(\xi)][1 - \Psi(\xi)]$, тому

$$M[T_1^\xi | \Xi = \xi] = \xi[1 - \Phi(\xi)][1 - \Psi(\xi)]. \quad (2.10)$$

Підставляючи вирази (2.8) – (2.10) у формулу (2.3), отримуємо

$$M[T_1] = \int_0^\infty \left\{ \int_0^v [1 - \Psi(u)]ud\Phi(u) + \int_0^v [1 - \Phi(x)]xd\Psi(x) + v[1 - \Psi(v)][1 - \Phi(v)] \right\} dF(v). \quad (2.11)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані.

Розглянемо часові діаграми процесу ТО при знаходженні ЗМ в непрацездатному стані (рис.2.3). Нехай в момент часу ξ ($0 < \xi < \infty$) відбудеться прихована відмова. Тоді, згідно з прийнятим обмеженням, ЗМ буде перебувати в непрацездатному стані або до настання явної відмови в момент $\gamma > \xi$ (рис.2.3, а), тобто на інтервалі часу (ξ, γ) , або до настання повторювальної відмови в момент $\eta > \xi$ (рис.2.3, б), тобто на інтервалі часу (ξ, η) .

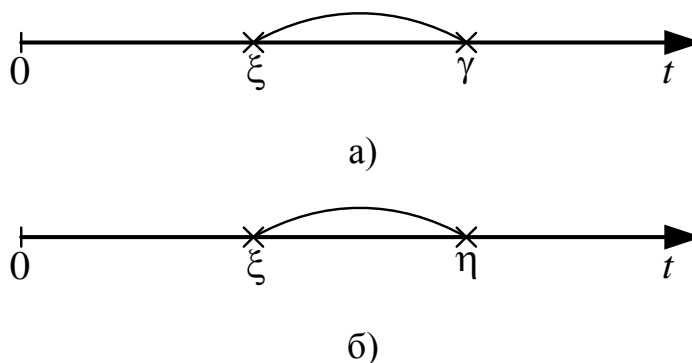


Рис. 2.3. Часові діаграми процесу ТО при знаходженні ЗМ в непрацездатному стані

Тоді середній час знаходження модуля в непрацездатному стані можна визначити за формулою повного МС неперервної випадкової величини

$$M[T_2] = \int_0^{\infty} \left\{ M[T_2^\gamma | \Xi = \xi] + M[T_2^\eta | \Xi = \xi] \right\} dF(\xi), \quad (2.12)$$

де $M[T_2^\gamma | \Xi = \xi]$ – умовне МС знаходження ЗМ в непрацездатному стані до моменту γ явної відмови за умови, що $\Xi = \xi$; $M[T_2^\eta | \Xi = \xi]$ – умовне МС знаходження ЗМ в непрацездатному стані до моменту η повторювальної відмови за умови, що $\Xi = \xi$.

Визначимо умовні МС, які входять у формулу (2.12). Використовуючи часові діаграми, які показані на рис. 2.3, запишемо наступні вирази для умовних МС:

$$M[T_2^\gamma | (\Xi = \xi) \cap (\Gamma = \gamma > \xi) \cap (H > \gamma)] = \gamma - \xi, \quad (2.13)$$

$$M[T_2^\eta | (\Xi = \xi) \cap (H = \eta > \xi) \cap (\Gamma > \eta)] = \eta - \xi. \quad (2.14)$$

Використовуючи формули (2.13) – (2.14), визначимо умовні МС, які входять у вираз (2.12).

Із умови $\Gamma = \gamma > \xi$ у формулі (2.13) випливає, що випадкова величина Γ може приймати значення, більші за ξ . Умова $H > \gamma$ вказує на те, що до моменту $\Gamma = \gamma$ явної відмови з ймовірністю $P(H > \gamma) = 1 - \Psi(\gamma)$ не відбудеться повторювальна відмова. Тому, позбавляючись від інших умов в (2.13), отримуємо

$$M[T_2^\gamma | \Xi = \xi] = \int_{\xi}^{\infty} (u - \xi) [1 - \Psi(u)] d\Phi(u). \quad (2.15)$$

Аналогічно, з умови $H = \eta > \xi$ у формулі (2.14) випливає, що випадкова величина H може приймати значення, більші за ξ , а умова $\Gamma > \eta$ вказує на те, що до моменту $H = \eta$ повторювальної відмови з ймовірністю $P(\Gamma > \eta) = 1 - \Phi(\eta)$ не відбудеться явна відмова. Отже,

$$M[T_2^\eta | \Xi = \xi] = \int_{\xi}^{\infty} (x - \xi) [1 - \Phi(x)] d\Psi(x). \quad (2.16)$$

Підставляючи вирази (2.15) і (2.16) у формулу (2.12), отримуємо

$$M[T_2] = \int_0^{\infty} \left\{ \int_v^{\infty} (u - v) [1 - \Psi(u)] d\Phi(u) + \int_v^{\infty} (x - v) [1 - \Phi(x)] d\Psi(x) \right\} dF(v). \quad (2.17)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови. Розглянемо часову діаграму процесу ТО при знаходженні ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови (рис.2.4). Нехай в момент часу η відбудеться повторювальна відмова, причому до цього моменту не було явної або прихованої відмов. Тоді будуть виконуватися операції з відновлення ЗМ. Середній час проведення цих операцій позначимо $t_{\text{ПВ}}$. По завершенні проведення відновлення через повторювальну відмову ЗМ перейде в стан працездатності і буде використовуватися за призначенням.

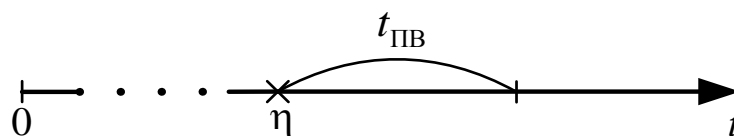


Рис. 2.4. Часова діаграма процесу ТО при знаходженні ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови

Для визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови розглянемо випадкову величину H зі щільністю розподілу ймовірностей напрацювання до повторювальної відмови $\psi(\eta)$ (рис. 2.5). Нехай на інтервалі часу від η до $\eta + d\eta$ ($0 < \eta < \infty$) відбудеться повторювальна відмова, тоді умовна ймовірність цієї події буде дорівнювати елементу ймовірності $\psi(\eta)d\eta$ за умови, що до моменту η не було явної та прихованої відмов, тобто

$$P\{\eta < H \leq \eta + d\eta | (\eta < \Gamma) \cap (\eta < \Xi)\} = \psi(\eta)d\eta. \quad (2.18)$$

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

$$P_{\xi > \eta}\{\eta < H \leq \eta + d\eta\} = [1 - \Phi(\eta)][1 - F(\eta)]\psi(\eta)d\eta. \quad (2.19)$$

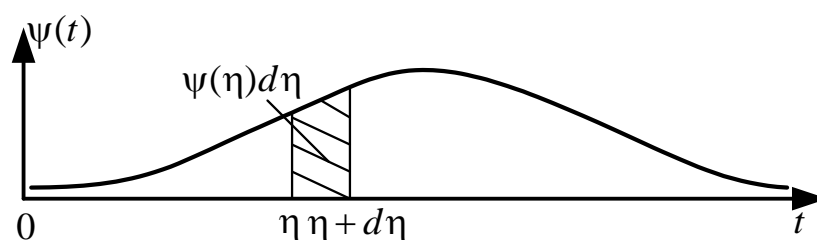


Рис. 2.5. Крива щільності розподілу напрацювання до повторювальної відмови

Імовірність повторювальної відмови на інтервалі $(0, \infty)$ визначається інтегруванням виразу (2.19) по області існування випадкової величини H , тобто

$$P\{0 < H \leq \infty\} = \int_0^{\infty} [1 - \Phi(x)][1 - F(x)]\psi(x)dx. \quad (2.20)$$

Середній час знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови визначається множенням середньої тривалості відновлення на ймовірність (2.20):

$$M[T_3] = t_{\text{ПВ}} P\{0 < H \leq \infty\} = t_{\text{ПВ}} \int_0^{\infty} [1 - F(x)][1 - \Phi(x)]\psi(x)dx. \quad (2.21)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови. Розглянемо часові діаграми процесу ТО при знаходженні ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови (рис. 2.6).

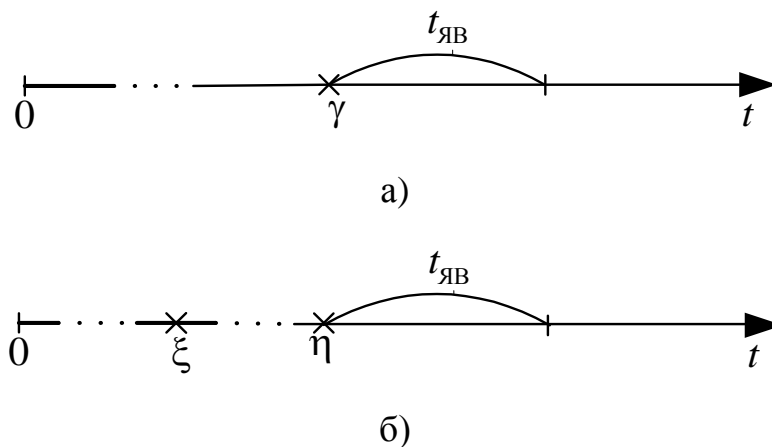


Рис. 2.6. Часова діаграма процесу ТО при знаходженні ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови

Нехай в момент часу γ відбудеться явна відмова, причому до цього моменту не було повторювальної відмови (рис. 2.6, а). В результаті будуть виконуватися операції з відновлення модуля. Середній час проведення цих операцій позначимо $t_{\text{яв}}$. По завершенні проведення відновлення ЗМ перейде в стан працездатності і буде використовуватися за призначенням. Далі припустимо, що в момент часу η відбудеться повторювальна відмова, причому до цього моменту вже станеться прихована відмова в момент часу ξ ($0 < \xi < \eta$) (рис. 2.6, б). В результаті приховану

відмову буде виявлено та буде проводитися відновлення модуля протягом часу $t_{\text{яв}}$. По завершенні відновлення ЗМ повернеться в працездатний стан.

Повертаючись до рис. 2.6, а, припустимо, що на інтервалі часу від γ до $\gamma + d\gamma$ ($0 < \gamma < \infty$) відбудеться явна відмова, тоді умовна ймовірність цієї події буде дорівнювати елементу ймовірності $\phi(\gamma)d\gamma$ за умови, що до моменту γ не було повторювальної відмови (рис. 2.7), тобто

$$P\{\gamma < \Gamma \leq \gamma + d\gamma | \gamma < H\} = \phi(\gamma)d\gamma. \quad (2.22)$$

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

$$P\{\gamma < \Gamma \leq \gamma + d\gamma\} = [1 - \Psi(\gamma)]\phi(\gamma)d\gamma. \quad (2.23)$$

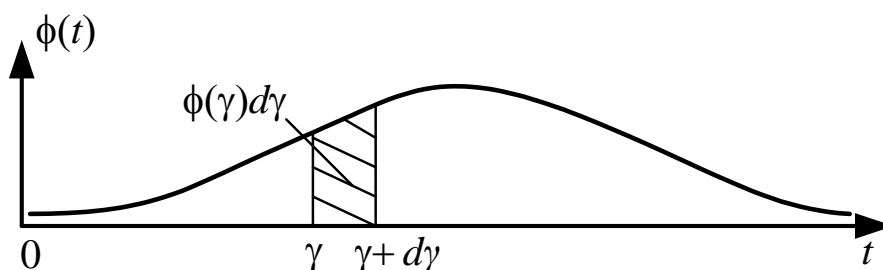


Рис. 2.7. Крива щільності розподілу напрацювання до явної відмови

Далі, повертаючись до рис. 2.6, б, припустимо, що в момент часу ξ відбудеться прихована відмова, а на інтервалі часу від η до $\eta + d\eta$ ($\xi < \eta < \infty$) відбудеться повторювальна відмова, тоді умовна ймовірність цієї події буде дорівнювати елементу ймовірності $\psi(\eta)d\eta$ за умови, що до моменту η не було явної відмови, тобто

$$P_{\xi < \eta} \{\eta < H \leq \eta + d\eta | (\eta < \Gamma) \cap (\eta > \Xi)\} = \psi(\eta)d\eta. \quad (2.24)$$

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

$$P_{\xi < \eta} \{\eta < H \leq \eta + d\eta\} = F(\eta)[1 - \Phi(\eta)]\psi(\eta)d\eta. \quad (2.25)$$

Ймовірність явної відмови на інтервалі $(0, \infty)$ визначається інтегруванням виразу (2.23) по області існування випадкової величини Γ , тобто

$$P\{0 < \Gamma \leq \infty\} = \int_0^{\infty} [1 - \Psi(u)]\phi(u)du. \quad (2.26)$$

Імовірність повторювальної відмови на інтервалі $(0, \infty)$ визначається інтегруванням виразу (2.25) по області існування випадкової величини H , тобто

$$P_{\xi < \eta} \{0 < H \leq \infty\} = \int_0^{\infty} F(x) [1 - \Phi(x)] \psi(x) dx. \quad (2.27)$$

Середній час знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови визначається за формулою повного МС неперервної випадкової величини

$$\begin{aligned} M[T_4] = t_{\text{яв}} P\{0 < \Gamma \leq \infty\} + t_{\text{яв}} P_{\xi < \eta} \{0 < H \leq \infty\} = \\ t_{\text{яв}} \int_0^{\infty} [1 - \Psi(u)] \phi(u) du + t_{\text{яв}} \int_0^{\infty} F(x) [1 - \Phi(x)] \psi(x) dx. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Таким чином, ми отримали математичні вирази, які визначають середній час знаходження ЗМ в кожному з розглянутих станів Z_1, \dots, Z_4 .

2.2.2. Математична модель процесу ТО ЗМ при експоненційному законі розподілу напрацювання модуля до відмови на нескінченному інтервалі часу. Знайдемо значення середнього часу знаходження ЗМ в станах Z_1, \dots, Z_4 і коефіцієнта готовності K_{Γ} для випадку експоненційного закону розподілу наробіток ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов.

Для їх визначення введемо такі позначення:

μ – інтенсивність явних відмов;

λ – інтенсивність прихованих відмов;

θ – інтенсивність повторювальних відмов.

Тоді ФР випадкових величин Γ , Ξ і H мають вигляд:

$$\Phi(t) = 1 - e^{-\mu t}; \quad (2.29)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (2.30)$$

$$\Psi(t) = 1 - e^{-\theta t}. \quad (2.31)$$

Відповідно, щільності розподілу ймовірностей цих випадкових величин визначаються як

$$\varphi(t) = \mu e^{-\mu t}; \quad (2.32)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad (2.33)$$

$$\psi(t) = \theta e^{-\theta t}. \quad (2.34)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в працездатному стані. Підставляючи значення ФР (2.29) – (2.31) і щільностей розподілу ймовірностей (2.32) – (2.34) у формулу (2.11), отримуємо

$$M[T_1] = \int_0^{\infty} \left\{ \mu \int_0^v u e^{-(\mu+\theta)u} du + \theta \int_0^v x e^{-(\mu+\theta)x} dx + v e^{-(\mu+\theta)v} \right\} dF(v). \quad (2.35)$$

Інтегруючи по частинах і використовуючи властивості інтегралу Рімана-Стільтєса, з виразу (2.35) отримуємо формулу для визначення середнього часу знаходження ЗМ в працездатному стані

$$M[T_1] = \frac{1}{\mu + \lambda + \theta}. \quad (2.36)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані. Підставляючи значення ФР (2.29) – (2.31) і щільностей розподілу ймовірностей (2.32) – (2.34) у формулу (2.17), отримуємо

$$M[T_2] = \int_0^{\infty} \left\{ \mu \int_v^{\infty} (u - v) e^{-(\mu+\theta)u} du + \theta \int_v^{\infty} (x - v) e^{-(\mu+\theta)x} dx \right\} dF(v). \quad (2.37)$$

Інтегруючи по частинах і використовуючи властивості інтеграла Рімана-Стільтєса, з виразу (2.37) отримуємо формулу для визначення середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані

$$M[T_2] = \frac{\lambda}{(\mu + \theta)(\mu + \lambda + \theta)}. \quad (2.38)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови. Підставляючи значення ФР (2.29) – (2.31) і щільностей розподілу ймовірностей (2.32) – (2.34) у формулу (2.21), отримуємо

$$M[T_3] = t_{\text{ПВ}} \theta \int_0^{\infty} e^{-(\mu+\lambda+\theta)x} dx. \quad (2.39)$$

Виконав інтегрування виразу (2.39), отримуємо формулу для визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення через повторювальну відмову

$$M[T_3] = \frac{t_{\text{ПВ}} \theta}{\mu + \lambda + \theta}. \quad (2.40)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови. Підставляючи значення ФР (2.29) – (2.31) і щільностей розподілу ймовірностей (2.32) – (2.34) у формулу (2.28), отримуємо

$$M[T_4] = t_{\text{яв}} \mu \int_0^{\infty} e^{-(\mu+\theta)u} du + t_{\text{яв}} \theta \int_0^{\infty} (e^{-(\mu+\theta)x} - e^{-(\mu+\lambda+\theta)x}) dx. \quad (2.41)$$

Виконав інтегрування виразу (2.41), отримуємо формулу для визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови

$$M[T_4] = t_{\text{яв}} \left(\frac{\mu}{\mu + \theta} + \frac{\theta \lambda}{(\mu + \theta)(\mu + \lambda + \theta)} \right). \quad (2.42)$$

Визначення коефіцієнта готовності ЗМ. Підставляючи значення середнього часу знаходження зйомного модуля в станах Z_1, \dots, Z_4 з виразів (2.36), (2.38), (2.40) і (2.42) у формулу (2.2), знайдемо коефіцієнт готовності ЗМ

$$K_{\Gamma} = \frac{\mu + \theta}{(\mu + \lambda + \theta)(1 + t_{\text{яв}}\mu) + \theta[t_{\text{пв}}(\mu + \theta) + t_{\text{яв}}\lambda]}. \quad (2.43)$$

Далі, щоб оцінити вплив параметрів моделі на коефіцієнт готовності, визначимо залежності між повнотою контролю та інтенсивностями явних μ і прихованих λ відмов.

Повноту контролю a визначимо як відношення інтенсивності відмов $\lambda_{\text{к}}$ в контрольованій частини ЗМ до суми інтенсивностей відмов $\lambda_{\text{к}} + \lambda_{\text{нк}}$ в контрольованій і неконтрольованій частинах ЗМ за формулою

$$a = \frac{\lambda_{\text{к}}}{\lambda_{\text{к}} + \lambda_{\text{нк}}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}. \quad (2.44)$$

Далі знаходимо залежність між інтенсивностями явних і прихованих відмов

$$\lambda = \mu \frac{1 - a}{a}. \quad (2.45)$$

Інтенсивності явних і прихованих відмов пов'язані рівнянням

$$\Lambda = \mu + \lambda, \quad (2.46)$$

де Λ – повна інтенсивність раптових відмов ЗМ.

Приклад 2.1. Нехай інтенсивність повторювальних відмов $\theta = 1 \times 10^{-4}$ год $^{-1}$ і $t_{\text{ЯВ}} = t_{\text{ПВ}} = 1$ год. На рис. 2.8 представлено графік залежності середнього часу знаходження ЗМ в працездатному стані $M[T_1]$ від повної інтенсивності раптових відмов ЗМ Λ при повноті контролю $a = 0,9$.

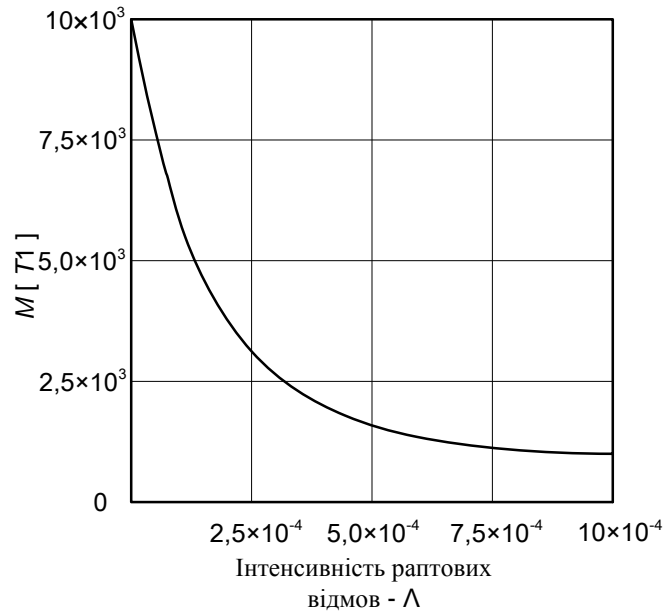


Рис. 2.8. Графік залежності середнього часу знаходження ЗМ в працездатному стані $M[T_1]$ від інтенсивності раптових відмов ЗМ Λ

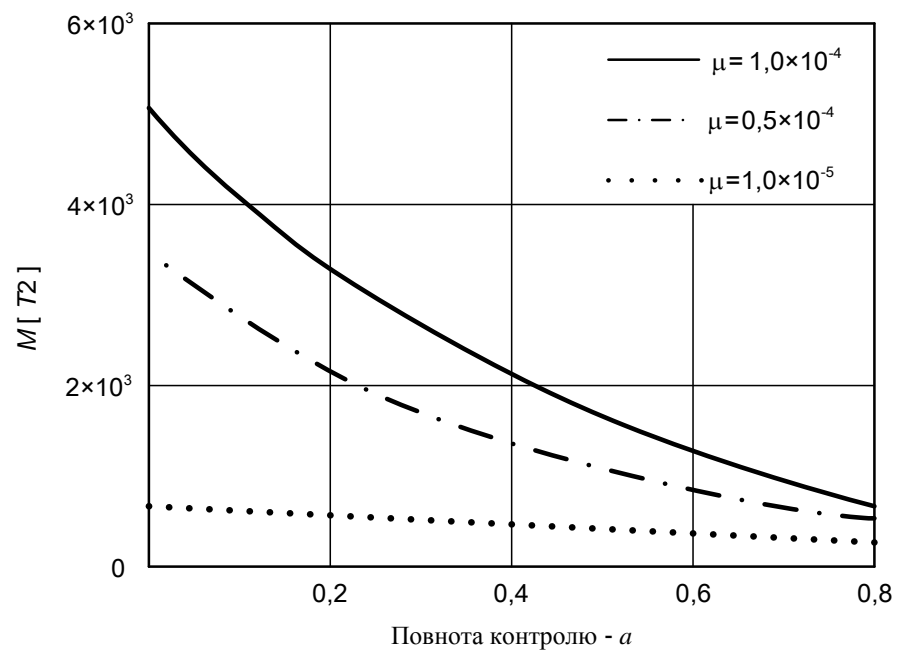


Рис. 2.9. Графіки залежності середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані $M[T_2]$ від повноти контролю

Із графіку видно, що зі збільшенням інтенсивності раптових відмов зменшується середній час знаходження ЗМ в працездатному стані.

На рис. 2.9 зображені графіки залежностей середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані $M[T_2]$ від повноти контролю при різних значеннях інтенсивності явних відмов. Як видно з графіків, зі збільшенням повноти контролю середній час знаходження ЗМ в непрацездатному стані зменшується.

На рис. 2.10 зображені графіки залежності коефіцієнта готовності від повноти контролю при різних значеннях інтенсивностей явних відмов. Із графіків видно, що коефіцієнт готовності збільшується зі збільшенням повноти контролю та інтенсивності явних відмов.

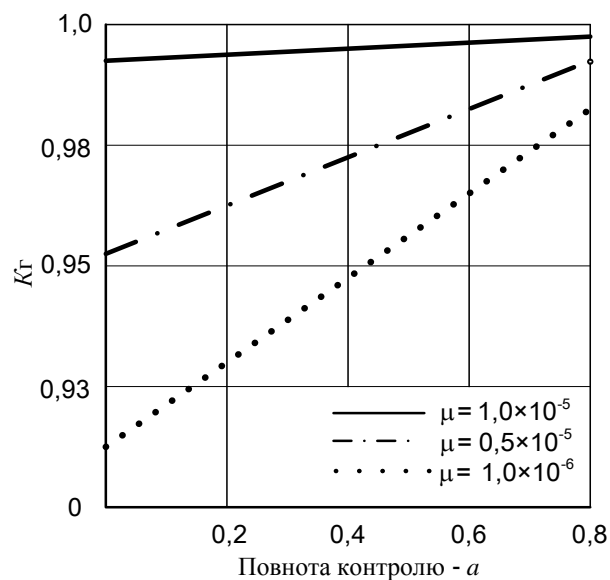


Рис. 2.10. Графіки залежності коефіцієнта готовності від повноти контролю

Використовуючи формулу (2.43), розрахуємо коефіцієнт готовності при різних значеннях інтенсивностей явних відмов, якщо повнота контролю дорівнює одиниці. Результати розрахунків занесені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

$\mu, \text{год}^{-1}$	K_G
1×10^{-5}	0,99978
$0,5 \times 10^{-5}$	0,99979
1×10^{-6}	0,99980

Як видно з табл. 2.1, коефіцієнт готовності має слабку залежність від інтенсивностей явних відмов при повноті контролю $a = 1$.

Приклад 2.2. Проведемо дослідження впливу інтенсивності повторювальних відмов на отримані показники при вихідних даних прикладу 2.1.

На рис. 2.11 наведені графіки залежностей $M[T_1]$, $M[T_2]$ і $M[T_3]$ від інтенсивності повторювальних відмов θ при $\mu = 1 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$. Значення показників по осі ординат відкладено в логарифмічному масштабі.

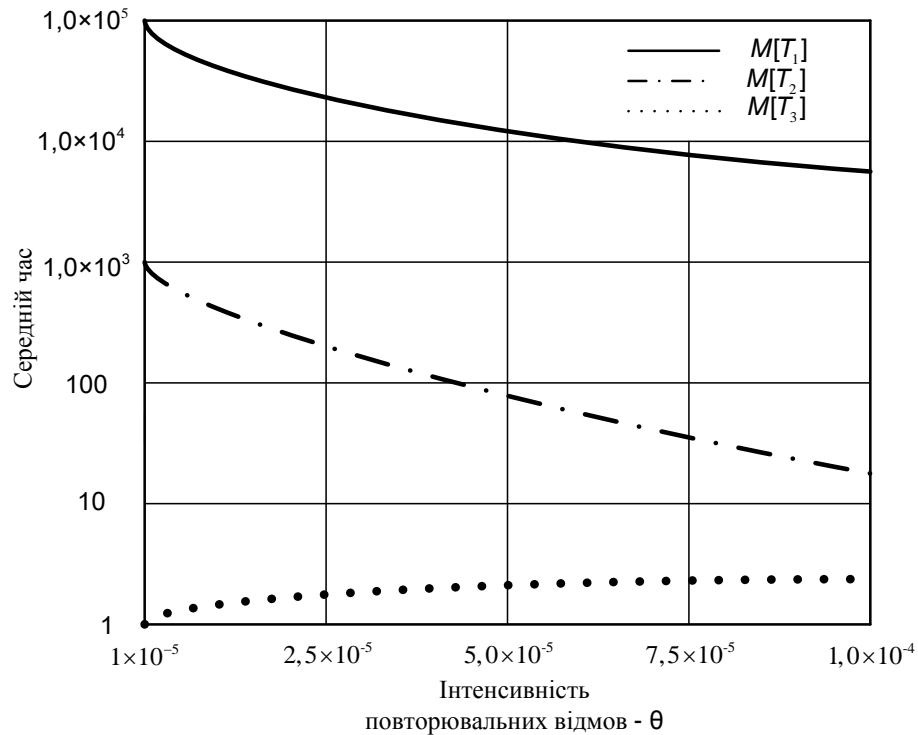


Рис. 2.11. Графіки залежності $M[T_1]$, $M[T_2]$ і $M[T_3]$ від інтенсивності повторювальних відмов за умови $\mu = 1 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$

Як видно з графіка, зі збільшенням інтенсивності повторювальних відмов зменшується середній час знаходження ЗМ в працездатному стані $M[T_1]$, тому що будь-яка повторювальна відмова зменшує час напрацювання ЗМ до відмови. Також зменшується середній час знаходження ЗМ в непрацездатному стані $M[T_2]$, оскільки якщо в неконтрольованій частині ЗМ відбудеться прихована відмова, а в контрольованій частині ЗМ далі станеться повторювальна відмова, то приховану відмову буде виявлено і модуль буде відновлений. Із форми графіка залежності $M[T_3]$ від інтенсивності повторювальних відмов θ видно, що середній час

перебування ЗМ в стані відновлення через повторювальну відмову збільшується зі збільшенням інтенсивності повторювальних відмов.

На рис. 2.12 наведено графіки залежності коефіцієнта готовності від інтенсивності повторювальних відмов при різних значеннях інтенсивностей явних відмов. Як видно з рис. 2.12, зі збільшенням інтенсивності повторювальних і явних відмов значення коефіцієнта готовності спочатку зростають, а потім повільно спадають. Така поведінка коефіцієнта готовності пояснюється наступним чином.

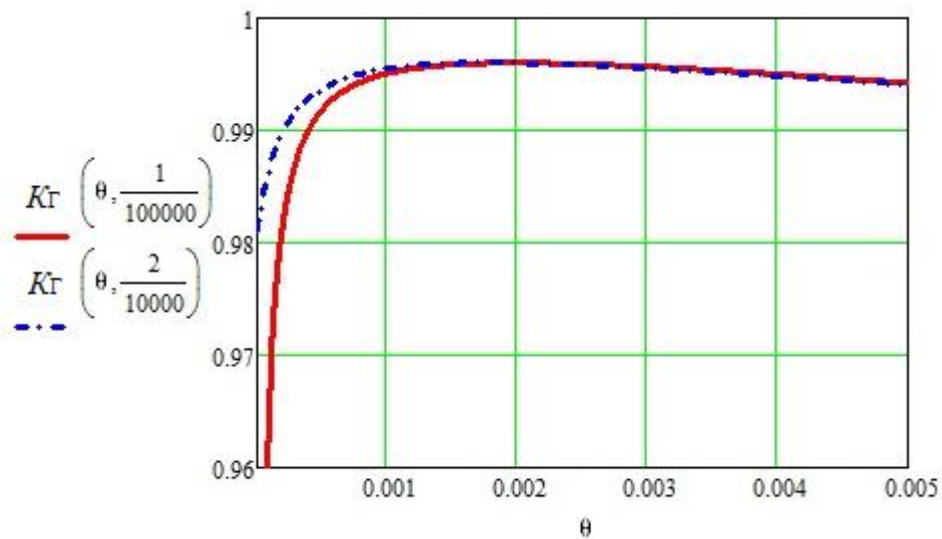


Рис. 2.12. Залежності коефіцієнта готовності від інтенсивності повторювальних відмов при різних значеннях інтенсивностей явних відмов

При малих значеннях інтенсивності повторювальних відмов θ зменшення $M[T_2]$ відбувається швидше, ніж зменшення $M[T_1]$, внаслідок чого значення коефіцієнта готовності зростають. При великих значеннях θ залежність протилежна: $M[T_1]$ спадає швидше, ніж $M[T_2]$. Тому коефіцієнт готовності зменшується. Слід також зауважити, що вплив інтенсивності явних відмов на коефіцієнт готовності зменшується зі збільшенням інтенсивності повторювальних відмов.

2.2.3. Математична модель ТО з урахуванням старіння елементів модуля на нескінченному інтервалі часу. Статистичний аналіз процесу технічної експлуатації обладнання СРЗ показує, що зі збільшенням часу напрацювання зйомних модулів збільшується інтенсивність відмов, однак найбільш часто виявляють себе повторювальні відмови внаслідок старіння елементів цих модулів.

Тому для врахування деградації параметрів модуля застосуємо DN -розподіл [3] напрацювання модуля до повторювальної відмови і оцінимо вплив параметрів DN -розподілу на готовність модуля СРЗ. При цьому ФР і щільність розподілу ймовірностей випадкової величини H матимуть вигляд:

$$\Psi(t) = \Phi\left(\frac{t - \mu_{DN}}{v_d \sqrt{\mu_{DN} t}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v_d^2}\right) \Phi\left(-\frac{t + \mu_{DN}}{v_d \sqrt{\mu_{DN} t}}\right), \quad (2.47)$$

$$\psi(t) = \frac{\sqrt{\mu_{DN}}}{v_d t \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(\mu_{DN} - t)^2}{2v_d^2 \mu_{DN} t}\right], \quad (2.48)$$

де v_d – коефіцієнт варіації деградаційного процесу, μ_{DN} – параметр DN -розподілу. Припустимо далі, що ФР і щільності розподілу ймовірностей випадкових величин Γ і Ξ визначаються з виразів (2.29) – (2.30) і (2.32) – (2.33) відповідно.

Приклад 2.3. Нехай інтенсивність явних відмов $\mu = 1 \times 10^{-4}$ год $^{-1}$, прихованих відмов $\lambda = 1 \times 10^{-5}$ год $^{-1}$, коефіцієнт варіації деградаційного процесу $v_d = 1,5$ год $^{-1}$ і $t_{яв} = t_{пв} = 1$ год. Використовуючи формули (2.43), (2.2), (2.47) і (2.48), розрахуємо коефіцієнти готовності $K_{ГDN}$ при різних значеннях параметра μ_{DN} , якщо повнота контролю дорівнює одиниці. Результати розрахунків занесені в табл. 2.2. Слід зауважити, що параметр DN -розподілу μ_{DN} має фізичний сенс інтенсивності повторювальних відмов.

Таблиця 2.2

$\mu_{DN}, \text{ год}^{-1}$	K_{Γ}	$K_{ГDN}$
$1,0 \times 10^{-5}$	0,9165	0,9160
$2,5 \times 10^{-5}$	0,9258	0,9242
$5,0 \times 10^{-5}$	0,9374	0,9332
10×10^{-5}	0,9522	0,9474

Як видно з табл. 2.2, відмінність в значеннях коефіцієнта готовності при DN -розподілі та при експоненційному законі розподілу напрацювання до повторювальної відмови становить 0,2–0,5 %.

Приклад 2.4. Дослідимо вплив інтенсивності явних відмов на готовність модуля СРЗ при вихідних даних прикладу 2.3, якщо інтенсивність повторювальних відмов $\theta = 1 \times 10^{-4}$ год⁻¹. Результати розрахунків занесені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

μ , год ⁻¹	K_{Γ}	$K_{\Gamma DN}$
$1,0 \times 10^{-5}$	0,9166	0,9112
$2,5 \times 10^{-5}$	0,9258	0,9202
$5,0 \times 10^{-5}$	0,9373	0,9308
10×10^{-5}	0,9522	0,9474

Як видно з табл. 2.3, коефіцієнти готовності мають слабку залежність від інтенсивностей явних відмов при повноті контролю $a = 1$.

Приклад 2.5. Дослідимо вплив коефіцієнта варіації деградаційного процесу v_d на готовність модуля СРЗ при вихідних даних прикладу 2.4. Результати розрахунків занесені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

v_d	K_{Γ}	$K_{\Gamma DN}$
0,5	0,9522	0,9594
1,0	0,9522	0,9541
1,5	0,9522	0,9474
2,0	0,9522	0,9404

Як видно з табл. 2.4, коефіцієнт готовності $K_{\Gamma DN}$ незначно збільшується при зменшенні коефіцієнта варіації деградаційного процесу v_d .

На прикладах показано, що для сучасного електронного обладнання СРЗ врахування старіння із застосуванням DN -розподілу напрацювання до повторювальної відмови при визначенні K_{Γ} практично збігається з визначенням K_{Γ} обладнання СРЗ із застосування експоненційного закону розподілу напрацювання до повторювальної відмови, оскільки обладнання має велике напрацювання до відмови (близько 100 тисяч годин).

2.3 Математична модель технічного обслуговування нерезервованого ЗМ СРЗ з урахуванням повного додаткового контролю (Модель 2).

2.3.1. Математична модель ТО нерезервованого ЗМ СРЗ при довільному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови на нескінченному інтервалі часу. Для розроблення математичної моделі процесу ТО ЗМ СРЗ з урахуванням повного додаткового контролю працездатності (ПДКП) використаємо Модель 1, яку розроблено в підрозділі 2.2. Для цього введемо додаткову умову виявлення прихованої відмови і запишемо її в наступному вигляді:

- прихована відмова виявляється при появі явної або повторювальної відмови; також прихована відмова виявляється в результаті проведення системою управління ТО СРЗ повного додаткового контролю працездатності (ПДКП) всього зйомного модуля в разі виявлення невідповідностей при передачі даних в радіоканалі або на приймальній стороні СРЗ [8].

Як і в Моделі 1, процес ТО ЗМ СРЗ будемо розглядати на нескінченному інтервалі часу у вигляді послідовності зміни різних станів ЗМ і який представимо випадковим регенеруючим процесом $Z(t)$ з кінцевим простором станів $Z = \bigcup_{i=1}^n Z_i$, ($i = 1, 2, \dots, n$).

Для опису процесу переходів ЗМ СРЗ в різні стани введемо додаткові позначення:

Ω ($\Omega \geq 0$) – випадкова величина, яка характеризує час до виявлення прихованої відмови за допомогою ПДКП ЗМ;

$t = \omega_i$, $i = 1, 2, 3, \dots$ – моменти часу виявлення прихованої відмови за допомогою ПДКП ЗМ.

Процес переходів з одного стану в інший наведено на діаграмі (рис. 2.13). Випадковий процес $Z(t)$ описується чотирма різними станами, в одному з яких може перебувати ЗМ СРЗ в довільний момент часу:

$Z(t) = Z_1$, якщо в момент t ЗМ знаходився в працездатному стані;

$Z(t) = Z_2$, якщо в момент t ЗМ знаходився в непрацездатному стані, тобто відмова сталася в неконтрольованій частині ЗМ;

$Z(t) = Z_3$, якщо в момент t ЗМ знаходився в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови;

$Z(t) = Z_4$, якщо в момент t модуль знаходився в стані відновлення внаслідок явної відмови.

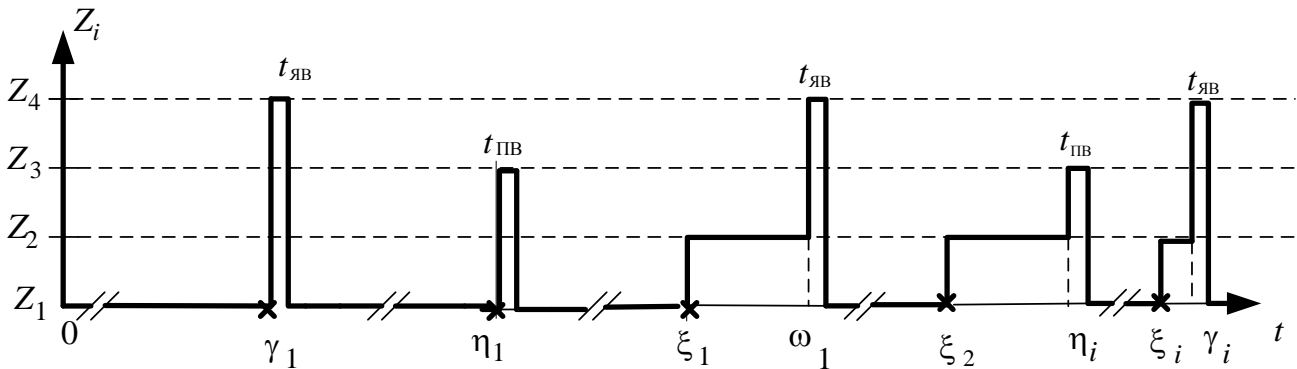


Рис. 2.13. Часова діаграма регенеруючого процесу ТО ЗМ СРЗ з урахуванням ПДКП

На відміну від Моделі 1, із непрацездатного стану Z_2 зйомний модуль може перейти в стан відновлення через явну відмову Z_4 , якщо в момент часу γ_i відбудеться явна відмова або в момент часу η_i відбудеться повторювальна відмова в контрольованій частині модуля, які буде виявлено засобами вбудованого контролю; або якщо в момент часу ω_i буде виявлено приховану відмову в неконтрольованій частині модуля за допомогою ПДКП ЗМ.

Для розрахунку коефіцієнта готовності за формулою (2.2) необхідно визначити значення математичних сподівань $M[T_1], \dots, M[T_4]$ часу знаходження ЗМ в кожному зі станів Z_1, \dots, Z_4 . Значення математичних сподівань $M[T_1], M[T_3], M[T_4]$ визначаються з виразів (2.11), (2.17) і (2.21) відповідно.

Для визначення $M[T_2]$ введемо такі позначення:

$H(t)$ – ФР часу до виявлення прихованої відмови за допомогою ПДКП ЗМ;

$h(t)$ – щільність розподілу ймовірностей часу до виявлення прихованої відмови за допомогою ПДКП ЗМ.

Середній час знаходження ЗМ СРЗ в непрацездатному стані будемо визначати за формулою повного математичного сподівання неперервної випадкової величини.

Визначення середнього часу знаходження ЗМ СРЗ в непрацездатному стані. Розглянемо часові діаграми процесу ТО при знаходженні ЗМ СРЗ в непрацездатному стані (рис. 2.14). Нехай в момент часу ξ ($0 < \xi < \infty$) відбудеться прихована відмова. Тоді, згідно з прийнятим обмеженням, ЗМ буде перебувати в непрацездатному стані або до настання явної відмови в момент $\gamma > \xi$ (рис. 2.14, а), тобто на інтервалі часу (ξ, γ) , або до настання повторювальної відмови в момент $\eta > \xi$ (рис. 2.14, б), тобто на інтервалі часу (ξ, η) , або до моменту $\omega > \xi$ виявлення прихованої відмови за допомогою ПДКП ЗМ (рис. 2.14, в), тобто на інтервалі часу (ξ, ω) .

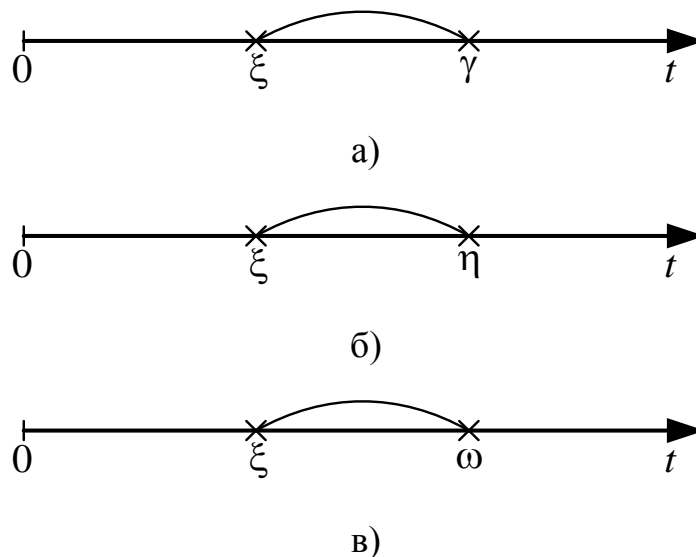


Рис. 2.14. Часові діаграми процесу ТО при знаходженні ЗМ СРЗ в непрацездатному стані

Тоді середній час знаходження модуля в непрацездатному стані можна визначати за формулою повного МС неперервної випадкової величини

$$M[T_2] = \int_0^{\infty} \{M[T_2^\gamma | \Xi = v] + M[T_2^\eta | \Xi = v] + M[T_2^\omega | \Xi = v]\} dF(v), \quad (2.49)$$

де $M[T_2^\gamma | \Xi = \xi]$ – умовне МС знаходження ЗМ в непрацездатному стані до моменту виникнення явної відмови γ за умови, що $\Xi = \xi$; $M[T_2^\eta | \Xi = \xi]$ – умовне МС знаходження ЗМ в непрацездатному стані до моменту η повторювальної відмови за умови, що $\Xi = \xi$; $M[T_2^\omega | \Xi = \xi]$ – умовне МС знаходження ЗМ в непрацездатному

стані до моменту ω виявлення прихованої відмови за допомогою ПДКП ЗМ за умови, що $\Xi = \xi$.

Визначимо умовні МС, які входять у формулу (2.49). Використовуючи часові діаграми, які показані на рис. 2.14, запишемо наступні вирази для умовних МС:

$$M \left[T_2^\gamma \mid (\Xi = \xi) \cap (\Gamma = \gamma > \xi) \cap (H > \gamma) \cap (\Omega > \gamma) \right] = \gamma - \xi, \quad (2.50)$$

$$M \left[T_2^\eta \mid (\Xi = \xi) \cap (H = \eta > \xi) \cap (\Gamma > \eta) \cap (\Omega > \eta) \right] = \eta - \xi, \quad (2.51)$$

$$M \left[T_2^\omega \mid (\Xi = \xi) \cap (\Omega = \omega > \xi) \cap (H > \omega) \cap (\Gamma > \omega) \right] = \omega - \xi. \quad (2.52)$$

Використовуючи формули (2.50) – (2.52), визначимо умовні МС, які входять у вираз (2.49).

Із умови $\Gamma = \gamma > \xi$ у формулі (2.50) випливає, що випадкова величина Γ може приймати значення, більші за ξ . Умова $H > \gamma$ вказує на те, що до моменту $\Gamma = \gamma$ явної відмови з ймовірністю $P(H > \gamma) = 1 - \Psi(\gamma)$ не відбудеться повторювальна відмова. Умова $\Omega > \gamma$ вказує на те, що до моменту $\Gamma = \gamma$ явної відмови з ймовірністю $P(\Omega > \gamma) = 1 - H(\gamma)$ не буде виявлено приховану відмову за допомогою ПДКП ЗМ. Тому, застосовуючи формулу умовного математичного сподівання неперервної випадкової величини, позбавляємося від трьох умов в (2.50) і отримуємо

$$M \left[T_2^\gamma \mid \Xi = \xi \right] = \int_{\xi}^{\infty} (u - \xi) [1 - \Psi(u)] [1 - H(u)] d\Phi(u). \quad (2.53)$$

Аналогічно, з умови $H = \eta > \xi$ у формулі (2.51) випливає, що випадкова величина H може приймати значення, більші за ξ . Умова $\Gamma > \eta$ вказує на те, що до моменту $H = \eta$ повторювальної відмови з ймовірністю $P(\Gamma > \eta) = 1 - \Phi(\eta)$ не відбудеться явна відмова, а умова $\Omega > \eta$ вказує на те, що до моменту $H = \eta$ повторювальної відмови з ймовірністю $P(\Omega > \eta) = 1 - H(\eta)$ не буде виявлено приховану відмову за допомогою ПДКП ЗМ. Отже,

$$M \left[T_2^\eta \mid \Xi = \xi \right] = \int_{\xi}^{\infty} (x - \xi) [1 - \Phi(x)] [1 - H(x)] d\Psi(x). \quad (2.54)$$

Далі, з умови $\Omega = \omega > \xi$ у формулі (2.52) випливає, що випадкова величина Ω може приймати значення, більші ніж ξ . Умова $\Gamma > \omega$ вказує на те, що до моменту

$\Omega = \omega$ виявлення прихованої відмови за допомогою ПДКП ЗМ з ймовірністю $P(\Gamma > \omega) = 1 - \Phi(\omega)$ не відбудеться явна відмова, а умова $H > \omega$ вказує на те, що до моменту $\Omega = \omega$ виявлення прихованої відмови за допомогою ПДКП ЗМ з ймовірністю $P(H > \omega) = 1 - \Psi(\omega)$ не відбудеться повторювальна відмова. Отже,

$$M[T_2^\omega | \Xi = \xi] = \int_{\xi}^{\infty} (y - \xi) [1 - \Phi(y)] [1 - \Psi(y)] dH(y). \quad (2.55)$$

Підставляючи вирази (2.53) – (2.55) у формулу (2.49), отримуємо

$$M[T_2] = \int_0^{\infty} \left\{ \int_v^{\infty} (u - v) [1 - \Psi(u)] [1 - H(u)] d\Phi(u) + \int_v^{\infty} (x - v) [1 - \Phi(x)] [1 - H(x)] d\Psi(x) + \int_v^{\infty} (y - v) [1 - \Phi(y)] [1 - \Psi(y)] dH(y) \right\} dF(v). \quad (2.56)$$

Таким чином, ми отримали математичний вираз, який дозволяє розрахувати середній час знаходження ЗМ СРЗ в непрацездатному стані з урахуванням ПДКП.

Коефіцієнт готовності ЗМ СРЗ для даної моделі визначається за формулою (2.2) підстановкою виразів (2.11), (2.21), (2.28) і (2.56).

2.3.2. Математична модель ТО нерезервованого ЗМ при експоненційному законі розподілу напрацювання модуля до відмови на нескінченному інтервалі часу. Знайдемо значення середнього часу знаходження ЗМ в станах Z_1, \dots, Z_4 і коефіцієнта готовності K_{Γ} для випадку експоненційного закону розподілу напрацювань ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов, а також до повного додаткового контролю працездатності ЗМ. Значення середнього часу знаходження ЗМ в станах Z_1 , Z_3 і Z_4 визначаються з виразів (2.36), (2.40) і (2.42) відповідно.

Для визначення знаходження ЗМ в непрацездатному стані позначимо інтенсивність проведення ПДКП ЗМ змінною ρ .

Тоді ФР випадкової величини Ω має вигляд:

$$H(t) = 1 - e^{-\rho t}; \quad (2.57)$$

Відповідно, щільність розподілу ймовірностей цієї випадкової величини визначається як

$$h(t) = \rho e^{-\rho t}. \quad (2.58)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані. Підставляючи значення ФР (2.29) – (2.31), (2.57) і щільності розподілу ймовірностей (2.32) – (2.34), (2.58) у формулу (2.56), отримуємо

$$M[T_2] = \int_0^{\infty} \left\{ \mu \int_v^{\infty} (u-v) e^{-(\mu+\theta+\rho)u} du + \theta \int_v^{\infty} (x-v) e^{-(\mu+\theta+\rho)x} dx + \right. \\ \left. + \rho \int_v^{\infty} (y-v) e^{-(\mu+\theta+\rho)y} dy \right\} dF(v). \quad (2.59)$$

Інтегруючи по частинах і використовуючи властивості інтеграла Рімана-Стільтєса, з виразу (2.59) отримаємо формулу для визначення середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані

$$M[T_2] = \frac{\lambda}{(\mu + \theta + \rho)(\mu + \lambda + \theta + \rho)}. \quad (2.60)$$

Визначення коефіцієнта готовності ЗМ. Підставляючи значення середнього часу знаходження зйомного модуля в станах G_1, \dots, G_4 з виразів (2.36), (2.40), (2.42) і (2.60) у формулу (2.2), знайдемо коефіцієнт готовності ЗМ

$$K_{\text{ГДК}} = \frac{(\mu + \theta)(\mu + \theta + \rho)(\mu + \lambda + \theta + \rho)}{(\mu + \theta + \rho)(\mu + \lambda + \theta + \rho) \left[(\mu + \theta)(1 + \theta t_{\text{ПВ}}) + t_{\text{ЯВ}}(2\mu + \lambda + \theta + \lambda\theta) \right] + \lambda(\mu + \theta)(\mu + \lambda + \theta)}. \quad (2.61)$$

Приклад 2.6. Нехай інтенсивність повторювальних відмов $\theta = 1 \times 10^{-4}$ год⁻¹, $t_{\text{ЯВ}} = t_{\text{ПВ}} = 1$ год, повнота контролю $a = 0,9$ і інтенсивність раптових відмов ЗМ $\Lambda = 1 \times 10^{-5}$ год⁻¹. Дослідимо отримані аналітичні вирази для $M[T_2]$ і $K_{\text{ГДК}}$ при різних значеннях інтенсивності виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП.

На рис. 2.15 і 2.16 зображені графіки залежностей середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані $M[T_2]$ і коефіцієнта готовності $K_{\text{ГДК}}$ від інтенсивності виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП.

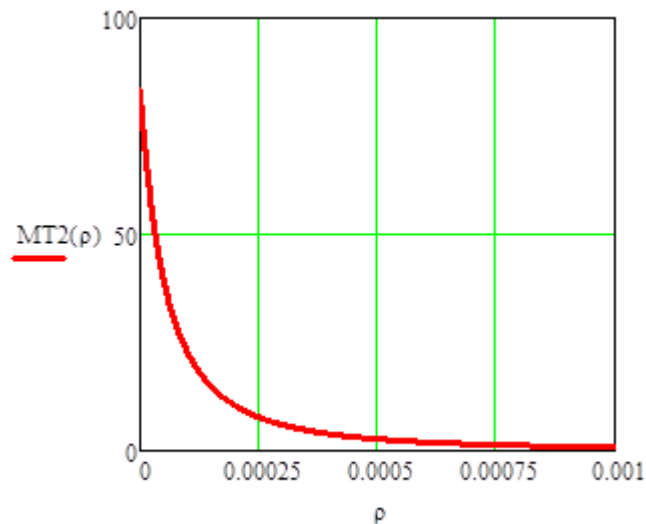


Рис. 2.15. Графік залежності середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані $M[T_2]$ від інтенсивності виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП

Як видно з графіків, зі збільшенням інтенсивності виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП середній час знаходження ЗМ в непрацездатному стані зменшується, що, у свою чергу, призводить до збільшення коефіцієнта готовності.

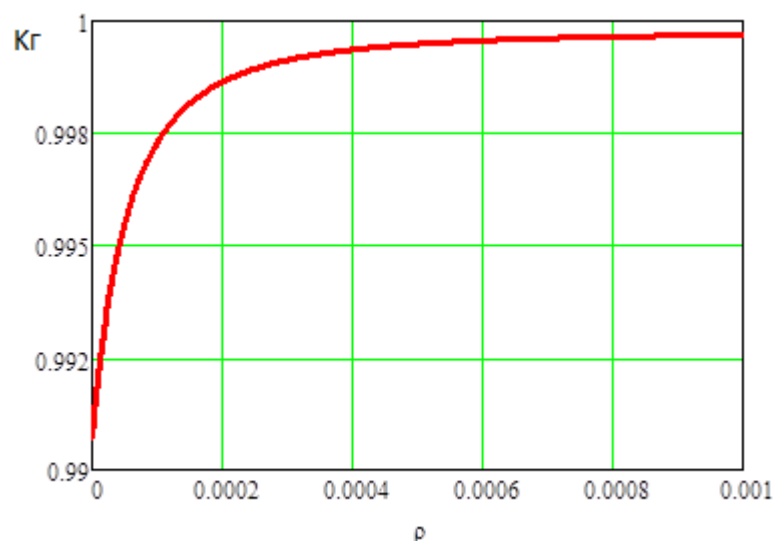


Рис. 2.16. Залежність коефіцієнта готовності від інтенсивності виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП

На рис. 2.17 зображено графіки залежностей коефіцієнтів готовності K_g і $K_{гдк}$ від інтенсивності повторювальних відмов при фіксованому значенні інтенсивності виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП $\rho = 0,042 \text{ год}^{-1}$.

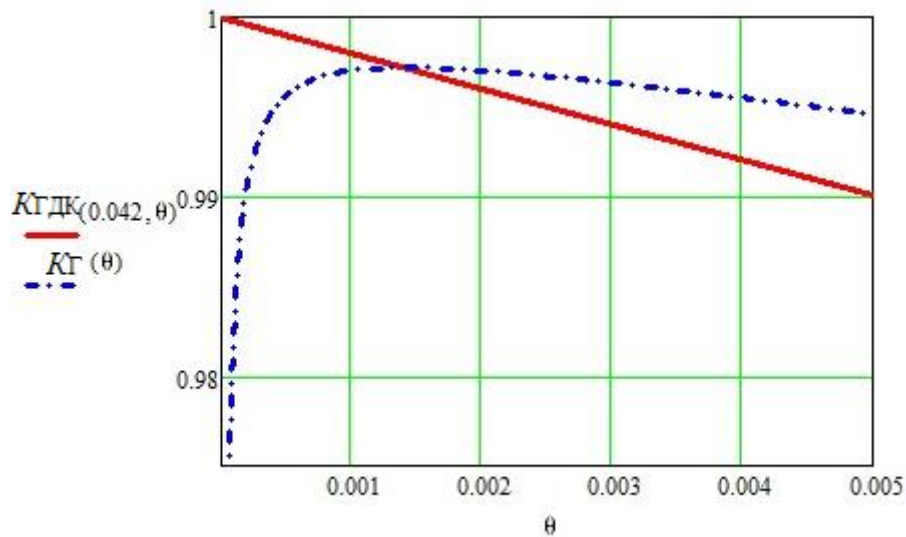


Рис. 2.17. Графіки залежності коефіцієнта готовності від інтенсивності повторювальних відмов

Як видно з графіків, при значеннях інтенсивності повторювальних відмов порядку $0,0005 \text{ год}^{-1}$ коефіцієнт готовності $K_{ГДК}$ має більші значення в порівнянні з $K_{Г}$ із Моделі 1. Це пояснюється тим, що приховані відмови в цьому випадку швидше виявляються за допомогою ПДКП. Із подальшим збільшенням θ значення $K_{ГДК}$ зменшуються, причому більшою мірою, ніж значення $K_{Г}$.

На прикладах показано, що ефект збільшення готовності систем радіозв'язку в разі застосування ПДКП має місце тільки до певних значень інтенсивності повторювальних відмов.

2.4 Математична модель технічного обслуговування нерезервованого зйомного модуля СРЗ на кінцевому інтервалі часу (Модель 3).

2.4.1. Математична модель ТО ЗМ при довільному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови на кінцевому інтервалі часу.

Для розроблення математичної моделі ТО ЗМ СРЗ на кінцевому інтервалі часу використаємо Модель 1, розроблену в підрозділі 2.2. Для цього зробимо зміну в п. 6 припущень і обмежень для Моделі 1 і запишемо його в наступному вигляді:

- на кінцевому інтервалі технічної експлуатації $(0, T)$ час відновлення ЗМ менший за напрацювання до відмови.

На відміну від Моделі 1, процес ТО ЗМ будемо розглядати на кінцевому інтервалі часу у вигляді послідовності зміни кінцевого числа різних станів ЗМ, які будемо описувати регенеруючим випадковим процесом $Z(t)$ з кінцевим простором станів $Z = \bigcup_{i=1}^n Z_i$, ($i = 1, 2, \dots, n$).

Для опису процесу переходів ЗМ в різні стани будемо використовувати позначення, введені для Моделі 1. Процес переходу ЗМ з одного стану в інший наведено на діаграмі (рис. 2.18).

Випадковий процес $Z(t)$ описується чотирма різними станами, які описані в Моделі 1, в одному з яких може перебувати ЗМ в довільний момент часу t , проте їхня кількість кінцева.

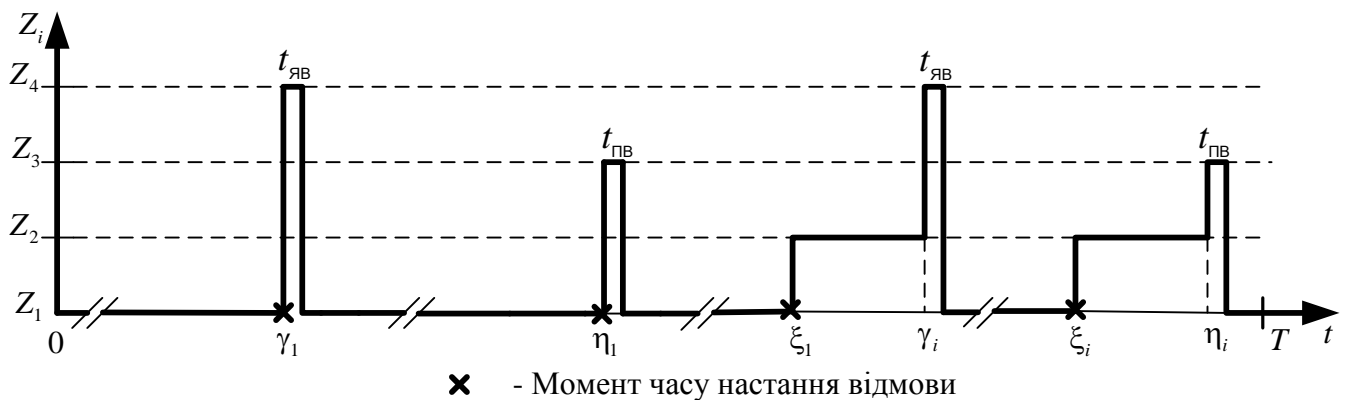


Рис. 2.18. Часова діаграма регенеруючого процесу
ТО ЗМ на кінцевому інтервалі часу

Для розрахунку коефіцієнта готовності ЗМ на кінцевому інтервалі часу за формулою (2.2) необхідно визначити значення математичних сподівань $M[T_1], \dots, M[T_4]$ часу знаходження ЗМ в кожному зі станів Z_1, \dots, Z_4 .

Середній час знаходження ЗМ в кожному зі станів будемо визначати за формулою повного математичного сподівання неперервної випадкової величини.

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в працездатному стані.
Розглянемо часові діаграми процесу ТО ЗМ при настанні явної, повторювальної та

прихованої відмов, а також за відсутності відмов на інтервалі технічної експлуатації (рис. 2.19).

Нехай в момент часу ξ ($0 < \xi \leq T$) відбудеться прихована відмова. Тоді, згідно з прийнятим обмеженням, ЗМ буде в працездатному стані до виникнення явної відмови в момент γ ($\gamma < \xi < T$) (рис. 2.19, а) або повторювальної відмови в момент η ($\eta < \xi < T$) (рис. 2.19, б) відповідно.

Також ЗМ буде працездатним до моменту виникнення прихованої відмови ξ ($\xi < T$) за умови, що до неї не було явної та повторювальної відмов (рис. 2.19, в), або до моменту часу T , якщо за період технічної експлуатації не відбулося жодної відмови (рис. 2.19, г).

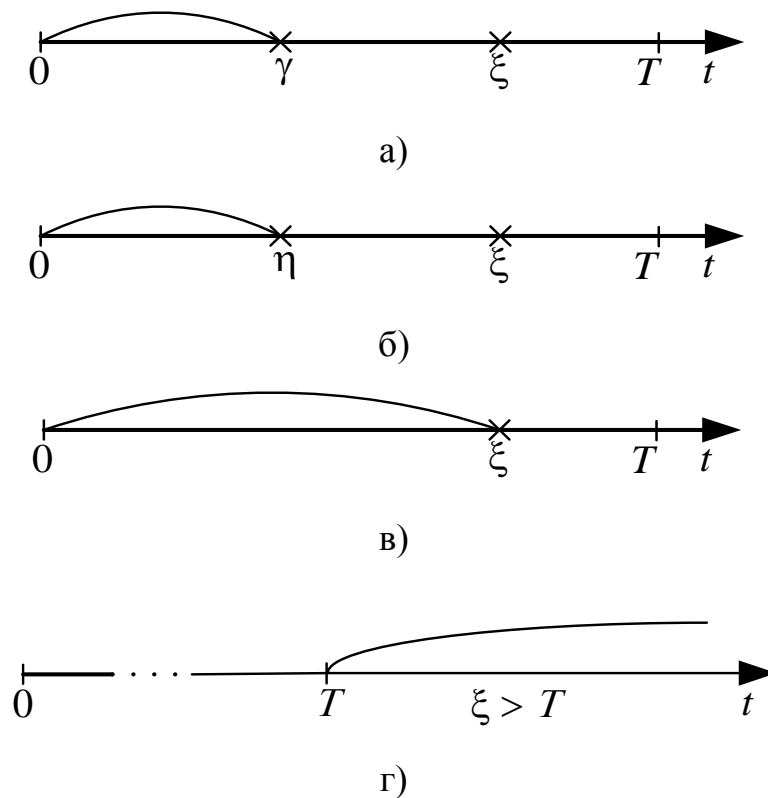


Рис. 2.19. Часові діаграми процесу ТО ЗМ при настанні явної відмови (а), повторювальної відмови (б), прихованої відмови (в) та за відсутності відмов на інтервалі $(0, T]$ (г)

Тоді середній час знаходження модуля в працездатному стані на інтервалі технічної експлуатації можна визначити за формулою повного МС неперервної випадкової величини

$$M[T_1] = \int_0^T \left\{ M[T_1^\gamma | \Xi = \xi] + M[T_1^\eta | \Xi = \xi] + M[T_1^\xi | \Xi = \xi] \right\} dF(\xi) + \int_T^\infty M[T_1^T | \Xi = \xi > T] dF(\xi), \quad (2.62)$$

де $M[T_1^\gamma | \Xi = \xi]$ – умовне МС випадкового напрацювання до явної відмови за умови, що $\Xi = \xi$; $M[T_1^\eta | \Xi = \xi]$ – умовне МС випадкового напрацювання до повторювальної відмови за умови, що $\Xi = \xi$; $M[T_1^\xi | \Xi = \xi]$ – умовне МС випадкового напрацювання до прихованої відмови за умови, що $\Xi = \xi$; $M[T_1^T | \Xi = \xi > T]$ – умовне МС часу безвідмової роботи модуля за умови, що на інтервалі $(0, T]$ не сталося прихованої відмови.

Перші три умовні МС $M[T_1^T | \Xi = \xi > T]$, які входять у формулу (2.62), визначаються з виразів (2.8)–(2.10). Використовуючи часову діаграму, яку показано на рис. 2.19, г, визначимо четверте умовне МС часу безвідмовної роботи модуля, яке входить у формулу (2.62).

При визначенні умовного МС $M[T_1^T | \Xi = \xi > T]$ необхідно враховувати, що прихована відмова в момент $\xi > T$ могла б відбутися тільки в тому випадку, якщо до цього моменту не було б явної та повторювальної відмов. Імовірність такої події дорівнює $[1 - \Phi(\xi)][1 - \Psi(\xi)]$. Крім того, необхідно врахувати, що напрацювання модуля не може бути більше, ніж T . Тому,

$$M[T_1^T | \Xi = \xi > T] = T[1 - \Phi(\xi)][1 - \Psi(\xi)]. \quad (2.63)$$

Отже,

$$\int_T^\infty M[T_1^T | \Xi = \xi > T] dF(\xi) = T \int_T^\infty [1 - \Phi(v)][1 - \Psi(v)] dF(v). \quad (2.64)$$

Підставляючи вирази (2.8)–(2.10) і (2.64) у формулу (2.62), отримуємо

$$M[T_1] = \int_0^T \left\{ \int_0^v [1 - \Psi(u)] u d\Phi(u) + \int_0^v [1 - \Phi(x)] x d\Psi(x) + v[1 - \Psi(v)][1 - \Phi(v)] \right\} dF(v) + T \int_T^\infty [1 - \Phi(v)][1 - \Psi(v)] dF(v). \quad (2.65)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані.

Розглянемо часові діаграми процесу ТО при знаходженні ЗМ в непрацездатному стані на інтервалі технічної експлуатації (рис. 2.20).

Нехай в момент часу ξ ($0 < \xi < T$) відбудеться прихована відмова. Тоді, згідно з прийнятим обмеженням, ЗМ буде перебувати в непрацездатному стані або до виникнення явної відмови в момент $\gamma > \xi$ ($\gamma < T$) (рис. 2.20, а), тобто на інтервалі часу (ξ, γ) , або до виникнення повторювальної відмови в момент $\eta > \xi$ ($\eta < T$) (рис. 2.20, б), тобто на інтервалі часу (ξ, η) . Також модуль буде перебувати в непрацездатному стані до моменту T (рис. 2.20, в), якщо за цей час не відбудуться явна і повторювальна відмови, тобто на інтервалі часу (ξ, T) .

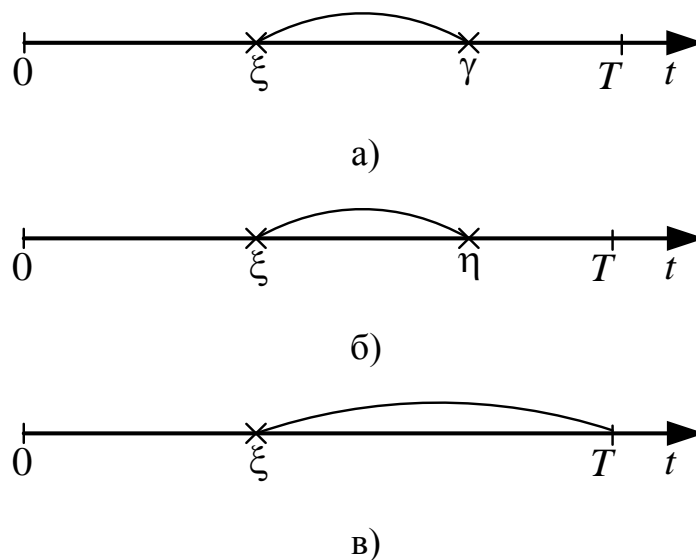


Рис. 2.20. Часові діаграми процесу ТО при знаходженні ЗМ в непрацездатному стані

Тоді середній час знаходження модуля в непрацездатному стані на інтервалі технічної експлуатації можна визначити за формулою повного МС неперервної випадкової величини

$$M[T_2] = \int_0^T \{M[T_2^\gamma | \Xi = \xi] + M[T_2^\eta | \Xi = \xi]\} dF(\xi) + \int_T^\infty M[T_2^T | \Xi = \xi] dF(\xi), \quad (2.66)$$

де $M[T_2^\gamma | \Xi = \xi]$ – умовне МС знаходження ЗМ в непрацездатному стані до моменту γ явного відмови за умови, що $\Xi = \xi$; $M[T_2^\eta | \Xi = \xi]$ – умовне МС знаходження ЗМ в непрацездатному стані до моменту η повторювальної відмови за умови, що $\Xi = \xi$; $M[T_2^T | \Xi = \xi]$ – умовне МС знаходження ЗМ в непрацездатному стані до моменту T за умови, що $\Xi = \xi$.

Перші два умовних МС у формулі (2.66) визначаються з виразів (2.15), (2.16). Визначимо третє умовне МС, яке входить у формулу (2.66). Використовуючи часову діаграму на рис. 2.20, в, запишемо:

$$M[T_2^T | \Xi = \xi] = T - \xi. \quad (2.67)$$

Із умов $\Gamma > T$ і $H > T$ у формулі (2.67) випливає, що випадкові величини Γ і H можуть набувати значень, більших за T , і, отже, на інтервалі часу $(0, T)$ з ймовірністю $P(\Gamma > T) = 1 - \Phi(T)$ не відбудеться явна відмова і з ймовірністю $P(H > T) = 1 - \Psi(T)$ не відбудеться повторювальна відмова. Тому, позбавляючись від інших умов в (2.67), отримуємо

$$M[T_2^T | \Xi = \xi] = (T - \xi)[1 - \Phi(T)][1 - \Psi(T)]. \quad (2.68)$$

Підставляючи вирази (2.15), (2.16) і (2.68) у формулу (2.66), отримуємо

$$M[T_2] = \int_0^T \left\{ \int_v^T (u - v)[1 - \Psi(u)] d\Phi(u) + \int_v^T (x - v)[1 - \Phi(x)] d\Psi(x) \right\} dF(v) + [1 - \Phi(T)][1 - \Psi(T)] \int_T^\infty (T - y) dF(y). \quad (2.69)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови. Розглянемо часову діаграму процесу ТО при знаходженні ЗМ у стані відновлення внаслідок повторювальної відмови на інтервалі технічної експлуатації (рис. 2.21). Нехай в момент часу η відбудеться повторювальна відмова, причому до цього моменту не було явної або прихованої відмов. Тоді будуть виконуватися операції з відновлення ЗМ. Середній час проведення цих операцій позначимо $t_{\text{ПВ}}$. По завершенні проведення відновлення ЗМ перейде в стан працездатності і буде використовуватися за призначенням.

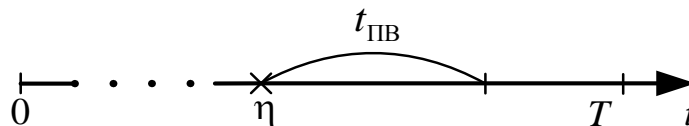


Рис. 2.21. Часова діаграма процесу ТО при знаходженні ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови

Для визначення середнього часу знаходження ЗМ у стані відновлення внаслідок повторювальної відмови розглянемо випадкову величину H зі щільністю розподілу ймовірностей наробітку до повторювальної відмови $\psi(\eta)$ (рис. 2.5). Нехай на інтервалі часу від η до $\eta + d\eta$ ($0 < \eta < T$) відбудеться повторювальна відмова, тоді умовна ймовірність цієї події буде визначатися за формулою (2.18), а безумовна ймовірність повторювальної відмови на інтервалі $(\eta, \eta + d\eta)$ буде розраховуватися за формулою (2.19).

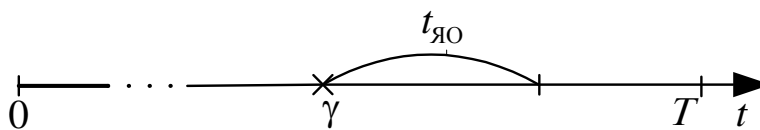
Ймовірність повторювальної відмови на інтервалі $(0, T)$ визначається інтегруванням виразу (2.19) по області існування випадкової величини H , тобто

$$P\{0 < H \leq T\} = \int_0^T [1 - \Phi(x)][1 - F(x)]\psi(x)dx. \quad (2.70)$$

Середній час знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови за період технічної експлуатації визначається множенням середньої тривалості відновлення на ймовірність (2.70):

$$M[T_3] = t_{ПВ} P\{0 < H \leq T\} = t_{ПВ} \int_0^T [1 - F(x)][1 - \Phi(x)]\psi(x)dx. \quad (2.71)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови. Розглянемо часові діаграми процесу ТО при знаходженні ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови (рис. 2.22).



а)

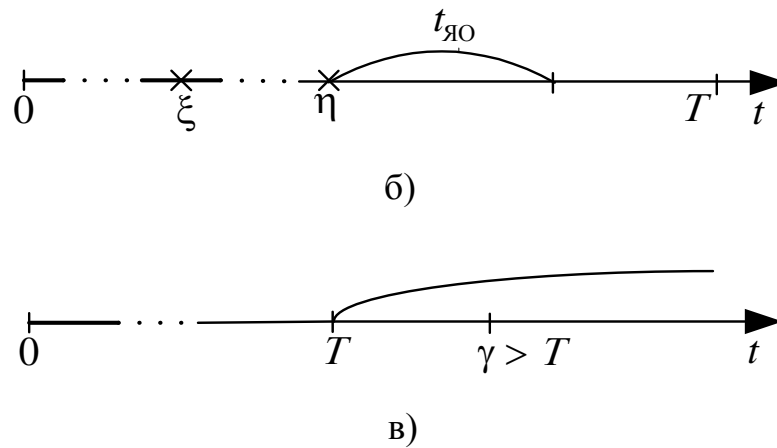


Рис. 2.22. Часова діаграма процесу ТО при знаходженні ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови

Нехай в момент часу γ ($\gamma < T$) відбудеться явна відмова, причому до цього моменту не було повторювальної відмови (рис. 2.22, а). Тоді будуть виконуватися операції з відновлення модуля. Середній час проведення цих операцій позначимо $t_{\text{яв}}$. По завершенні відновлення ЗМ перейде в стан працездатності і буде використовуватися за призначенням. Далі припустимо, що в момент часу η відбудеться повторювальна відмова, причому до цього моменту вже сталася прихована відмова в момент часу ξ ($0 < \xi < \eta$) (рис. 2.22, б). В результаті приховану відмову буде виявлено і буде проводитися відновлення модуля протягом часу $t_{\text{яв}}$. По завершенні відновлення ЗМ повернеться в працездатний стан. Випадок, коли на інтервалі часу $(0, T)$ не відбудеться явна відмова, зображений на рис. 2.22, в.

Тоді середній час знаходження модуля в стані відновлення внаслідок явної відмови на інтервалі технічної експлуатації можна визначити за формулою:

$$M[T_4] = t_{\text{яв}} P\{0 < \Gamma \leq T\} + t_{\text{яв}} P_{\xi < \eta}\{0 < H \leq T\} + t_{\text{яв}} P\{T < \Gamma\}. \quad (2.72)$$

Імовірність явної відмови на інтервалі $(0, T)$ визначається інтегруванням виразу (2.23) по області існування випадкової величини, тобто

$$P\{0 < \Gamma \leq T\} = \int_0^T [1 - \Psi(u)] \phi(u) du. \quad (2.73)$$

Імовірність повторювальної відмови на інтервалі $(0, T)$ визначається інтегруванням виразу (2.25) по області існування випадкової величини H , тобто

$$P_{\xi < \eta} \{0 < H \leq T\} = \int_0^T F(u) [1 - \Phi(u)] \psi(u) du. \quad (2.74)$$

Імовірність того, що $T < \Gamma$, визначається за формулою:

$$P\{T < \Gamma\} = [1 - \Psi(T)] \int_T^{\infty} \phi(u) du. \quad (2.75)$$

Середній час знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови на інтервалі технічної експлуатації визначається множенням середньої тривалості відновлення на ймовірності (2.73)(2.75)

$$\begin{aligned} M[T_4] &= t_{\text{ЯВ}} P\{0 < \Gamma \leq T\} + t_{\text{ЯВ}} P_{\xi < \eta} \{0 < H \leq T\} + t_{\text{ЯВ}} P\{T < \Gamma\} = \\ &= t_{\text{ЯВ}} \int_0^T [1 - \Psi(u)] \phi(u) du + t_{\text{ЯВ}} \int_0^T F(u) [1 - \Phi(u)] \psi(u) du + t_{\text{ЯВ}} [1 - \Psi(T)] \int_T^{\infty} \phi(u) du \end{aligned} \quad (2.76)$$

Таким чином, ми отримали математичні вирази, які визначають середній час знаходження ЗМ в кожному з розглянутих станів Z_1, \dots, Z_4 .

2.4.2. Математична модель ТО ЗМ при експоненційному законі розподілу напрацювання модуля до відмови на кінцевому інтервалі часу. Знайдемо значення середнього часу знаходження ЗМ в станах Z_1, \dots, Z_4 і коефіцієнта готовності K_{Γ} для випадку експоненційного закону розподілу напрацювання ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов. Для їхнього визначення будемо використовувати позначення інтенсивностей відмов з Моделі 1. Тоді ФР і щільності розподілу ймовірностей випадкових величин Γ , Ξ і H будуть визначатися за формулами (2.29) – (2.31) і (2.32) – (2.34) відповідно.

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в працездатному стані. Підставляючи значення ФР (2.29) – (2.31) і щільностей розподілу ймовірностей (2.32) – (2.34) у формулу (2.65), отримаємо

$$\begin{aligned} M[T_1] &= \lambda \int_0^T \left\{ \mu \int_0^v u e^{-(\mu+\theta)u} du + \theta \int_0^v x e^{-(\mu+\theta)x} dx + v e^{-(\mu+\theta)v} \right\} e^{-\lambda v} dv + \\ &+ T \lambda \int_T^{\infty} e^{-(\mu+\lambda+\theta)v} dv \end{aligned} \quad (2.77)$$

Інтегруючи по частинах і використовуючи властивості інтеграла Рімана-Стільтєса, з виразу (2.77) отримаємо формулу для визначення середнього часу знаходження ЗМ в працездатному стані

$$M[T_1] = \frac{\lambda e^{-(\mu+\lambda+\theta)T} (1+T(\mu+\theta)) - e^{-\lambda T} (\mu+\lambda+\theta) + \mu + \theta}{(\mu+\theta)(\mu+\lambda+\theta)}. \quad (2.78)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані.

Підставляючи значення ФР (2.29) – (2.31) і щільностей розподілу ймовірностей (2.32) – (2.34) у формулу (2.69), отримаємо

$$M[T_2] = \lambda \int_0^T \left\{ \mu \int_v^T (u-v) e^{-(\mu+\theta)u} du + \theta \int_v^T (x-v) e^{-(\mu+\theta)x} dx \right\} e^{-\lambda v} dv + \\ + \lambda e^{-(\mu+\theta)T} \int_T^\infty (T-y) e^{-\lambda y} dy. \quad (2.79)$$

Інтегруючи по частинах і використовуючи властивості інтеграла Рімана-Стільтєса, з виразу (2.79) отримаємо формулу для визначення середнього часу знаходження ЗМ в непрацездатному стані

$$M[T_2] = \frac{\lambda - \lambda e^{-(\mu+\lambda+\theta)T} (1+T(\mu+\lambda+\theta)) - T(\mu+\lambda+\theta)^2 e^{-(\mu+\theta)T} (1-e^{-\lambda T})}{(\mu+\lambda+\theta)^2} + \\ + \frac{\lambda^3 (1-e^{-(\mu+\lambda+\theta)T}) - e^{-(\mu+\lambda+\theta)T} (\mu+\theta)(\mu+\lambda+\theta)[(\mu+\theta)\lambda T + (\mu+\lambda+\theta)]}{\lambda(\mu+\theta)(\mu+\lambda+\theta)^2} - \\ - \frac{(\mu+\lambda+\theta)^2 e^{-(\mu+\theta)T} (1-e^{-\lambda T})(\lambda-\mu-\theta)}{\lambda(\mu+\theta)(\mu+\lambda+\theta)^2}. \quad (2.80)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови. Підставляючи значення ФР (2.29) – (2.31) і щільностей розподілу ймовірностей (2.32) – (2.34) у формулу (2.71), отримаємо

$$M[T_3] = t_{\text{ПВ}} P\{0 < H \leq T\} = t_{\text{ПВ}} \theta \int_0^T e^{-(\mu+\lambda+\theta)x} dx. \quad (2.81)$$

Інтегруванням виразу (2.81) отримаємо формулу для визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови

$$M[T_3] = \frac{t_{\text{ПВ}} \theta (1 - e^{-(\mu+\lambda+\theta)T})}{\mu + \lambda + \theta}. \quad (2.82)$$

Визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови. Підставляючи значення ФР (2.29) – (2.31) і щільностей розподілу ймовірностей (2.32) – (2.34) у формулу (2.76), отримаємо

$$\begin{aligned} M[T_4] &= t_{\text{яв}} P\{0 < \Gamma \leq T\} + t_{\text{яв}} P_{\xi < \eta}\{0 < H \leq T\} + t_{\text{яв}} P\{T < \Gamma\} = \\ &= t_{\text{яв}} \mu \int_0^T e^{-(\mu+\theta)u} du + t_{\text{яв}} \theta \int_0^T (1 - e^{-\lambda u}) e^{-(\mu+\theta)u} du + t_{\text{яв}} \mu e^{-\theta T} \int_T^\infty e^{-\mu u} du. \end{aligned} \quad (2.83)$$

Інтегруванням виразу (2.83) отримаємо формулу для визначення середнього часу знаходження ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови

$$M[T_4] = \frac{t_{\text{яв}} (\mu + \lambda + \theta) - t_{\text{яв}} \theta (1 - e^{-(\mu+\lambda+\theta)T})}{(\mu + \lambda + \theta)}. \quad (2.84)$$

Визначення коефіцієнта готовності ЗМ на кінцевому інтервалі часу. Підставляючи значення середнього часу знаходження зйомного модуля в станах Z_1, \dots, Z_4 з виразів (2.78), (2.80), (2.82) і (2.84) у формулу (2.2), знайдемо коефіцієнт готовності ЗМ на кінцевому інтервалі часу

$$K_{\text{ГК}} = \frac{\lambda y (\lambda z [1 + Tx] - e^{-\lambda T} y + x)}{\lambda y (\lambda z [1 + Tx] - e^{-\lambda T} y + x + \theta x [1 - z] [t_{\text{ПВ}} - t_{\text{яв}}] + t_{\text{яв}} xy) + \lambda^2 x (1 - z (1 + Ty)) - y^2 m (1 - e^{-\lambda T}) (\lambda x T + (\lambda - \mu - \theta)) + \lambda^3 (1 - z) - zxy (T \lambda x + y)}, \quad (2.85)$$

де $x = (\mu + \theta)$, $y = (\mu + \lambda + \theta)$, $z = e^{-yT}$ і $m = e^{-xT}$.

Приклад 2.7. Нехай інтенсивність повторювальних відмов $\theta = 5 \times 10^{-3}$ год⁻¹, інтенсивності явних і прихованих відмов $\mu = \lambda = 5 \times 10^{-4}$ год⁻¹, повнота контролю $a = 1$ і $t_{\text{яв}} = t_{\text{ПВ}} = 1$ год. Дослідимо вплив величини T інтервалу технічної експлуатації на коефіцієнт готовності ЗМ. Результати розрахунків занесено в таблицю 2.5.

Таблиця 2.5

T , год	$K_{\text{ГК}}$	$K_{\text{Г}}$
50×10^3	0,868069	0,916461
10×10^4	0,903394	0,916461
50×10^4	0,916461	0,916461

Як видно з табл. 2.5, значення коефіцієнта готовності на кінцевому інтервалі часу $K_{\text{ГК}}$ збільшується зі збільшенням інтервалу технічної експлуатації і при $T \rightarrow \infty$

збігається зі значенням коефіцієнта готовності K_G на нескінченному інтервалі часу, що підтверджує адекватність розроблених моделей.

Приклад 2.8. Дослідимо вплив величини інтервалу технічної експлуатації і інтенсивності повторювальних відмов на коефіцієнт готовності ЗМ $K_{ГК}$ при вихідних даних прикладу 2.7.

На рис. 2.23 наведені графіки залежності коефіцієнта готовності від величини інтервалу технічної експлуатації при різних значеннях інтенсивності повторювальних відмов. Як видно з рис. 2.23, значення коефіцієнта готовності $K_{ГК}$ спочатку зменшується на невеликих інтервалах, а потім поступово збільшується зі збільшенням величини T . Причому, зі зростанням інтенсивності повторювальних відмов значення КГ $K_{ГК}$ збільшується, оскільки приховані відмови в цьому випадку виявляються швидше.

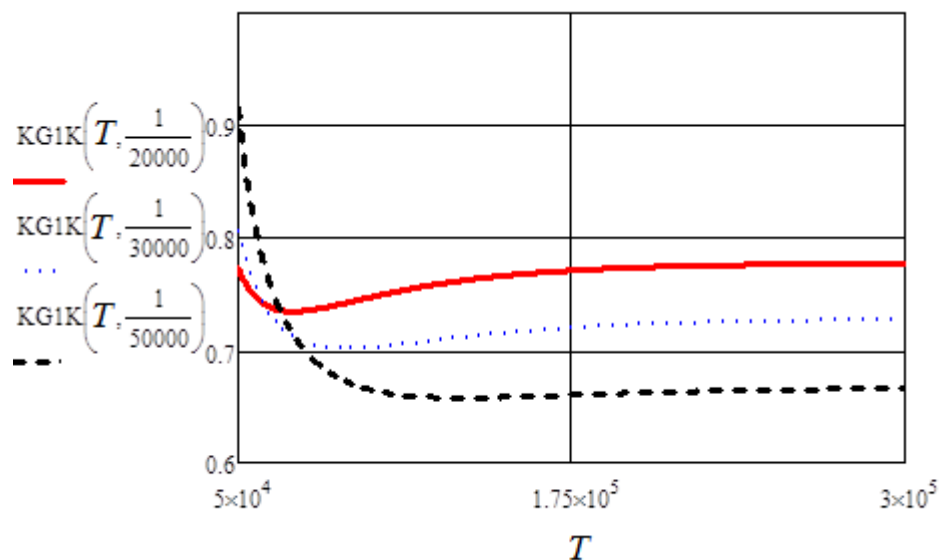


Рис. 2.23. Графіки залежностей коефіцієнта готовності від величини інтервалу технічної експлуатації

2.5 Висновки

1. Розроблено математичні моделі ТО нерезервованого обладнання СРЗ, яке охоплене безперервним контролем працездатності, які, на відміну від відомих, дозволяють одночасно враховувати вплив на готовність обладнання СРЗ інтенсивностей явних, прихованих і повторювальних відмов, а також повноти контролю.

2. Отримано аналітичні вирази (2.11), (2.17), (2.21), (2.28) для розрахунку середнього часу знаходження нерезервованого ЗМ СРЗ в основних станах процесу ТО при довільному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови, що дозволяє оцінити готовність обладнання СРЗ на нескінченному інтервалі часу.

3. Виведено співвідношення (2.36), (2.38), (2.40), (2.42), які дозволяють оцінити середній час знаходження нерезервованого ЗМ в досліджуваних станах процесу ТО при експоненційному розподілі напрацювання ЗМ до відмови, та отримано вираз (2.43) для оцінювання коефіцієнта готовності. Проведено дослідження отриманих показників та проілюстровано, що готовність обладнання СРЗ має істотну залежність від інтенсивності повторювальних відмов і повноти контролю.

4. Запропоновано модель процесу ТО, яка дозволяє оцінити вплив на готовність обладнання СРЗ деградаційних процесів, властивих електронним компонентам, які входять до складу цифрового обладнання СРЗ. У моделі використано DN -розподіл напрацювання ЗМ до повторювальної відмови. Проведений чисельний аналіз розробленої моделі показав, що для сучасного електронного обладнання СРЗ врахування старіння із застосуванням DN -розподілу напрацювання до повторювальної відмови при визначенні КГ практично збігається з визначенням КГ обладнання СРЗ із застосування експоненційного закону розподілу напрацювання до повторювальної відмови.

5. На підставі моделі 1, яку розроблено в підрозділі 2.2, отримано математичну модель для визначення середнього часу знаходження нерезервованого ЗМ в різних станах процесу ТО з урахуванням повного додаткового контролю при довільному і експоненційному законах напрацювання ЗМ до відмови. На конкретному прикладі показано, що додатковий контроль істотно знижує час знаходження ЗМ в непрацездатному стані та підвищує коефіцієнт готовності.

6. Розроблено математичну модель процесу ТО нерезервованого ЗМ СРЗ на кінцевому інтервалі технічної експлуатації для довільного закону розподілу напрацювання до відмови з урахуванням розглянутих видів відмов і повноти контролю. Отримано аналітичні вирази (2.65), (2.69), (2.71), (2.76) для розрахунку

середнього часу знаходження ЗМ СРЗ в основних станах процесу ТО, що дозволяє оцінити готовність обладнання СРЗ на кінцевому інтервалі технічної експлуатації.

7. Отримано вирази (2.78), (2.80), (2.82), (2.84), які дозволяють оцінити середній час знаходження ЗМ в досліджуваних станах процесу ТО, та отримано вираз (2.85) для оцінювання коефіцієнта готовності на кінцевому інтервалі технічної експлуатації при експоненційному законі напрацювання модуля на відмову. Показано, що при прагненні інтервалу технічної експлуатації до нескінченності, вирази (2.43) і (2.85) сходяться до одного значення, що підтверджує адекватність розроблених моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Иванов А. Б. Контроль соответствия в телекоммуникациях и связи. Часть 1 – М.: Комп. САЙРУС СИСТЕМС, 2001. – 376 с.
2. Крыницкий Л. Г., Борисенко Т. М., Гельфман Т. Э., Мусянков М. И., Чернявский Г. М. Основы теории надежности РЭС: учебное пособие. МГИРЭА – Москва, 2000 г. – 83 с.
3. Ulansky V. V., Terentyeva I. E. Availability modeling of a digital electronic system with intermittent failures and continuous testing. Engineering Letters. – 2017. – V. 25, № 2. – P. 104 – 111.
4. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Держстандарт України. – Київ, 1995. – 36 с.
5. Грібов В. М. Теорія надійності систем авіоніки: У 2 ч.: Навч. посібник/ В. М. Грібов, Ю. В. Грищенко, А. В. Скрипець, В. П. Стрельников. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2006. – 324 с.
6. Куперман М., Аверьянов Д. Резервный центр обработки данных. Оценка надежности. – Электроника – НТБ вып. № 4 [Електронний ресурс]. URL: www.electronics.ru/journal/article/75 (дата звернення: 12.11.15).
7. Ulansky V. V., Terentyeva I. E. Availability assesement of a telecommunications system with permanent and intermittent faults. 2017 IEEE First Ukraine conference on

electrical and computer engineering (UKRCON), 29 May – 2 June 2017: conference proceedings. – К., 2017. – pp. 908 – 911.

8. Терентьева І. Є. Оцінка доступності інформаційно-комунікаційних систем з урахуванням різних видів відмов. Інформаційна безпека та комп'ютерні технології: міжн. наук.-практ. конф., 24–25 березня 2016 р.: тези доп. – Кіровоград, 2016. – С. 135.

9. Smith W. L., Regenerative stochastic processes, Proceedings of the Royal Society. London. Series A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences 232, London. – 1955. – pp. 6 – 31.

10. Уланский В. В., Мачалин И. А., Терентьева И. Е., Варченко О. И. Оценка готовности оборудования универсальной наземной сети радиодоступа. Новітні технології в телекомунікаціях (ДУІКТ-Карпати-2013): VI міжнар. наук.-техн. симпоз., 21–25 січня 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 144–145.

11. Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Алгоритм диагностирования телекоммуникационных систем. Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO-2012-Livadia): VIII міжнар. наук. конф., 4–8 жовтня 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 144.

12. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 1979. – 496 с.

13. А. Н. Ширяев. Вероятность. – М.: Наука, 1980. – 576 с.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ РЕЗЕРВОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТА МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ПОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ

3.1. Постановка завдань.

В сучасних системах радіозв'язку (СРЗ) з метою підвищення готовності практично все обладнання резервується. Тому необхідно оцінити показники надійності обладнання СРЗ для різних структур резервування, використовуючи аналітичні вирази, які отримані в розроблених в розділі 2 моделях [1].

Також необхідно провести оцінювання економічної ефективності процесу ТО резервованого обладнання СРЗ для можливості прийняття рішень про вибір оптимальної структури резервування. Для цього необхідно розробити показники для оцінювання експлуатаційних витрат резервованого обладнання СРЗ, які дозволять оцінити експлуатаційні витрати в періоди гарантійного та післягарантійного термінів сервісного обслуговування [2].

Важливим завданням також є дослідження впливу на експлуатаційні витрати показників надійності, структури експлуатаційного резервування обладнання СРЗ та кількості запасних модулів в обмінному фонді в періоди гарантійного та післягарантійного термінів обслуговування з урахуванням необхідного рівня готовності обладнання СРЗ [3, 4].

3.2. Математичні моделі технічного обслуговування резервованих зйомник модулів обладнання СРЗ.

Як показано в розділі 2, в процесі експлуатації i -й зйомний модуль (ЗМ) може перебувати в одному зі станів Z_i ($i = 1, \dots, 4$), де m – кількість ЗМ. При цьому середній цикл регенерації $M [T_0]$ визначається за формулою (2.1).

3.2.1. Визначення коефіцієнта готовності для послідовної з точки зору надійності структури. Система з послідовним з точки зору надійності включенням ЗМ працездатна тоді і тільки тоді, коли працездатними є всі її

елементи. Як показано в роботах [5–7], коефіцієнт готовності для послідовної з точки зору надійності структури визначається як

$$K_{GS} = \prod_{i=1}^m M[T_{1,i}] / M[T_{0,i}]. \quad (3.1)$$

При довільному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови математичні сподівання, які входять в формулу (3.1), визначаються з наступних виразів: (2.11), (2.17), (2.21) і (2.28) для Моделі 1; (2.11), (2.21), (2.28) і (2.56) для Моделі 2; (2.66), (2.69), (2.71) і (2.76) для Моделі 3, які було розроблено в розділі 2.

Визначення коефіцієнта готовності при експоненційному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови. Знайдемо значення коефіцієнта готовності для послідовної структури в разі експоненційного закону розподілу напрацювань ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов.

Підставляючи значення середнього часу знаходження ЗМ в станах Z_1, \dots, Z_4 із виразів (2.36), (2.38), (2.40) і (2.42) у формулу (3.1), знайдемо коефіцієнт готовності K_{GS} для послідовної структури для Моделі 1:

$$K_{GS} = \prod_{i=1}^m \frac{\mu_i + \theta_i}{(\mu_i + \lambda_i + \theta_i)(1 + t_{\text{яв},i}\mu_i) + \theta_i [t_{\text{пв},i}(\mu_i + \theta_i) + t_{\text{яв},i}\lambda_i]}. \quad (3.2)$$

Підставляючи значення середнього часу знаходження ЗМ в станах Z_1, \dots, Z_4 із виразів (2.36), (2.40), (2.42) і (2.60) у формулу (3.1), знайдемо коефіцієнт готовності $K_{ГДКС}$ для послідовної структури для Моделі 2:

$$K_{ГДКС} = \prod_{i=1}^m \frac{(\mu_i + \theta_i)(\mu_i + \theta_i + \rho_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \rho_i)}{(\mu_i + \theta_i + \rho_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \rho_i) [(\mu_i + \theta_i)(1 + \theta_i t_{\text{пв},i}) + t_{\text{яв},i}(2\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \lambda_i \theta_i)] + \lambda_i (\mu_i + \theta_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i)}. \quad (3.3)$$

Підставляючи значення середнього часу знаходження ЗМ в станах Z_1, \dots, Z_4 із виразів (2.78), (2.80), (2.82) і (2.84) у формулу (3.1), знайдемо коефіцієнт готовності $K_{ГКС}$ для послідовної структури для Моделі 3:

$$K_{\text{ГКС}} = \prod_{i=1}^m \frac{\lambda_i y_i (\lambda_i z_i [1 + T_i x_i] - e^{-\lambda_i T_i} y_i + x_i)}{\lambda_i y_i (\lambda_i z_i [1 + T_i x_i] - e^{-\lambda_i T_i} y_i + x_i + \theta_i x_i [1 - z_i] [t_{\text{ПВ},i} - t_{\text{ЯВ},i}] + t_{\text{ЯВ},i} x_i y_i) + \lambda_i^2 x_i (1 - z_i (1 + T_i y_i)) - y_i^2 m_i (1 - e^{-\lambda_i T_i}) (\lambda_i x_i T_i + (\lambda_i - \mu_i - \theta_i)) + \lambda_i^3 (1 - z_i) - z_i x_i y_i (T_i \lambda_i x_i + y_i)}, \quad (3.4)$$

де $x_i = (\mu_i + \theta_i)$, $y_i = (\mu_i + \lambda_i + \theta_i)$, $z_i = e^{-y_i T_i}$ і $m_i = e^{-x_i T_i}$.

Приклад 3.1. Нехай повна інтенсивність раптових відмов $\Lambda = 1 \times 10^{-4}$ год $^{-1}$, інтенсивність повторювальних відмов $\theta = 1 \times 10^{-4}$ год $^{-1}$, інтенсивність виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП $\rho = 4 \times 10^{-2}$ год $^{-1}$ і $t_{\text{ЯВ}} = t_{\text{ПВ}} = 1$ год. Значення інтенсивностей явних і прихованих відмов знаходяться з рівняння (2.46). Знайдемо значення коефіцієнтів готовності $K_{\text{Г}}$ і $K_{\text{ГДК}}$ для послідовної структури в разі експоненційного закону розподілу напрацювань ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов при різних значеннях повноти контролю a .

Таблиця 3.1

Значення коефіцієнтів готовності $K_{\text{Г}}$ і $K_{\text{ГДК}}$ для послідовної структури

m	$a = 0,6$		$a = 0,9$	
	$K_{\text{Г}}$	$K_{\text{ГДК}}$	$K_{\text{Г}}$	$K_{\text{ГДК}}$
1	0,799744	0,999795	0,949639	0,999798
2	0,639590	0,999590	0,901814	0,999597
3	0,511508	0,999385	0,856398	0,999396
4	0,409076	0,999180	0,813269	0,999195

Як видно з табл. 3.1, значення коефіцієнтів готовності $K_{\text{Г}}$ і $K_{\text{ГДК}}$ зменшуються зі збільшенням кількості ЗМ (m), що підтверджується властивістю послідовної з точки зору надійності системи: зі збільшенням числа елементів системи її надійність знижується. Причому готовність системи тим вище, чим більше повнота контролю.

3.2.2. Визначення коефіцієнта готовності для паралельної з точки зору надійності структури. Система з паралельним з точки зору надійності включенням ЗМ працездатна тоді і тільки тоді, коли є працездатним принаймні один із ЗМ. Коефіцієнт готовності для такої структури будемо визначати за формулою [5, 6]

$$K_{\text{ГП}} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - M[T_{1,i}] / M[T_{0,i}]). \quad (3.5)$$

При довільному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови математичні сподівання, які входять у формулу (3.5), визначаються з наступних виразів: (2.11), (2.17), (2.21) і (2.28) для Моделі 1; (2.11), (2.21), (2.28) і (2.56) для Моделі 2; (2.65), (2.69), (2.71) і (2.76) для Моделі 3, які було розроблено в розділі 2.

Розглянута структура широко застосовується в системах радіоз'язку для навантаженого резервування ЗМ як в режимі постійного резервування (active), так і в режимі заміщення (standby).

Визначення коефіцієнта готовності при експоненційному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови. Знайдемо значення коефіцієнта готовності для паралельної структури для випадку експоненціального закону розподілу напрацювань ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов.

Підставляючи значення середнього часу знаходження ЗМ в станах Z_1, \dots, Z_4 із виразів (2.36), (2.38), (2.40) і (2.42) у формулу (3.5), знайдемо коефіцієнт готовності $K_{ГР}$ для паралельної структури для Моделі 1:

$$K_{ГР} = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \frac{\mu_i + \theta_i}{(\mu_i + \lambda_i + \theta_i)(1 + t_{яв,i}\mu_i) + \theta_i [t_{пв,i}(\mu_i + \theta_i) + t_{яв,i}\lambda_i]} \right). \quad (3.6)$$

Підставляючи значення середнього часу знаходження ЗМ в станах Z_1, \dots, Z_4 із виразів (2.36), (2.40), (2.42) і (2.60) у формулу (3.5), знайдемо коефіцієнт готовності $K_{ГДКР}$ для паралельної структури для Моделі 2:

$$K_{ГДКР} = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \frac{(\mu_i + \theta_i)(\mu_i + \theta_i + \rho_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \rho_i)}{(\mu_i + \theta_i + \rho_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \rho_i) \left[(\mu_i + \theta_i)(1 + \theta_i t_{пв,i}) + t_{яв,i}(2\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \lambda_i \theta_i) \right] + \lambda_i (\mu_i + \theta_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i)} \right). \quad (3.7)$$

Підставляючи значення середнього часу знаходження ЗМ в станах Z_1, \dots, Z_4 із виразів (2.78), (2.80), (2.82) і (2.84) у формулу (3.5), знайдемо коефіцієнт готовності $K_{ГКР}$ для паралельної структури для Моделі 3:

$$K_{\text{ГКР}} = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \frac{\lambda_i y_i (\lambda_i z_i [1 + T_i x_i] - e^{-\lambda_i T_i} y_i + x_i)}{\lambda_i y_i (\lambda_i z_i [1 + T_i x_i] - e^{-\lambda_i T_i} y_i + x_i + \theta_i x_i [1 - z_i] [t_{\text{ПВ},i} - t_{\text{ЯВ},i}] + t_{\text{ЯВ},i} x_i y_i) + \lambda_i^2 x_i (1 - z_i (1 + T_i y_i)) - y_i^2 m_i (1 - e^{-\lambda_i T_i}) (\lambda_i x_i T_i + (\lambda_i - \mu_i - \theta_i)) + \lambda_i^3 (1 - z_i) - z_i x_i y_i (T_i \lambda_i x_i + y_i)} \right) \quad (3.8)$$

де $x_i = (\mu_i + \theta_i)$, $y_i = (\mu_i + \lambda_i + \theta_i)$, $z_i = e^{-y_i T_i}$ і $m_i = e^{-x_i T_i}$.

Приклад 3.2. Нехай повна інтенсивність раптових відмов $\Lambda = 1 \times 10^{-4}$ год $^{-1}$, інтенсивність повторювальних відмов $\theta = 1 \times 10^{-4}$ год $^{-1}$, інтенсивність виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП $\rho = 4 \times 10^{-2}$ год $^{-1}$ і $t_{\text{ЯВ}} = t_{\text{ПВ}} = 1$ год. Значення інтенсивностей явних і прихованих відмов знаходяться з рівняння (2.46). Знайдемо значення коефіцієнтів готовності $K_{\text{Г}}$ і $K_{\text{ГДК}}$ для паралельної структури для випадку експоненційного закону розподілу напрацювань ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов при різних значеннях повноти контролю.

Таблиця 3.2

Значення коефіцієнтів готовності $K_{\text{Г}}$ і $K_{\text{ГДК}}$ для паралельної структури

m	$a = 0,6$		$a = 0,9$	
	$K_{\text{Г}}$	$K_{\text{ГДК}}$	$K_{\text{Г}}$	$K_{\text{ГДК}}$
1	0,799744	0,799872	0,949639	0,999798
2	0,959896	0,999992	0,997463	0,99999976
3	0,991969	0,99999996	0,999872	0,99999989
4	0,998392	0,99999989	0,999993	0,99999994

Із отриманих в табл. 3.2 результатів видно, що значення коефіцієнтів готовності $K_{\text{Г}}$ і $K_{\text{ГДК}}$ збільшуються зі збільшенням кількості m резервних ЗМ, що підтверджується властивістю паралельної системи: зі збільшенням числа елементів системи її надійність збільшується. Причому готовність системи тим вище, чим більше повнота контролю.

3.2.3. Структура типу « k із m ». Система, яка має структуру « k із m », працездатна, якщо працездатні принаймні k із m ЗМ, які входять у систему. Система вважається такою що відмовила, якщо кількість непрацездатних ЗМ перевищує поріг k . При $k > 0,5 m$ структура « k із m » реалізує логіку більшості й відноситься до класу мажоритарних структур. У порівнянні з іншими способами резервування мажоритарні структури є найбільш захищеними від повторювальних відмов і випадкових збоїв в радіоканалах передачі дискретної інформації. Тому логіка « k із m » використовується в резервованих системах радіозв'язку з метою підвищення достовірності передачі інформації. Функціонування структури « k із m » можливо тільки при наявності пристрою обробки результатів контролю, який приймає рішення за принципом більшості. З точки зору надійності цей пристрій пов'язано зі структурою « k із m » послідовно і його відмова призводить до відмови всієї системи, тому приймемо допущення, що пристрій є безвідмовним.

Якщо структура типу « k із m » складається з однотипних ЗМ, то коефіцієнт готовності будемо визначати з роботи [5] за формулою:

$$K_{ГМ} = \sum_{i=k}^m c_m^i (M[T_1]/M[T_0])^i (1 - M[T_1]/M[T_0])^{m-i}, \quad (3.9)$$

где $c_m^i = \frac{m!}{i!(m-i)!}$ – кількість комбінацій.

У разі експоненційного закону розподілу напрацювань ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов середній час перебування ЗМ в станах $M[T_1], \dots, M[T_4]$ визначається з виразів (2.36), (2.38), (2.40) і (2.42) для Моделі 1; (2.36), (2.60), (2.40) і (2.42) для Моделі 2; (2.78), (2.80), (2.82) і (2.84) для Моделі 3 відповідно.

Приклад 3.3. Нехай повна інтенсивність раптових відмов $\Lambda = 1 \times 10^{-4}$ год⁻¹, інтенсивність повторювальних відмов $\theta = 1 \times 10^{-4}$ год⁻¹, інтенсивність виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП $\rho = 4 \times 10^{-2}$ год⁻¹ і $t_{ЯВ} = t_{ПВ} = 1$ год. Значення інтенсивностей явних і прихованих відмов знаходяться з рівняння (2.45). Знайдемо значення коефіцієнтів готовності $K_{Г}$ і $K_{ГДК}$ для структури « k із m » для випадку

експоненційного закону розподілу напрацювань ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов при різних значеннях повноти контролю.

Таблиця 3.3

Значення коефіцієнтів готовності K_{Γ} і $K_{\Gamma\text{ДК}}$ для структури « k із m »

c_m^i	$a = 0,6$		$a = 0,9$	
	K_{Γ}	$K_{\Gamma\text{ДК}}$	K_{Γ}	$K_{\Gamma\text{ДК}}$
c_3^1	0,991969	0,999987	0,999872	0,999998
c_3^2	0,855754	0,999979	0,992646	0,999987
c_3^3	0,511508	0,999385	0,856398	0,999396

Із табл. 3.3 видно, що значення коефіцієнтів готовності K_{Γ} і $K_{\Gamma\text{ДК}}$ мають максимальні величини у тому випадку, коли на один працюючий ЗМ доводиться два резервних. Причому готовність системи тим вище, чим більше повнота контролю.

3.2.4. Визначення коефіцієнта готовності для змішаної структури.

Послідовно-паралельна структура. Нехай система складається з n послідовно з'єднаних з точки зору надійності підсистем. Причому кожна підсистема з номером j ($j = \overline{1, n}$) є паралельною структурою з i ($i = \overline{1, m}$) ЗМ. Відмова системи настає при відмові хоча б однієї з підсистем. Коефіцієнт готовності для послідовно-паралельної структури будемо визначати за формулою [5, 6]

$$K_{\text{ГСП}} = \prod_{j=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - M[T_{1,ij}] / M[T_{0,ij}]) \right), \quad (3.10)$$

де $M[T_{0,ij}]$ – середній цикл регенерації будь-якого зі ЗМ j -ї підсистеми для відповідних моделей, розроблених в розділі 2; $M[T_{1,ij}]$ – середній час знаходження будь-якого зі ЗМ j -ї підсистеми в стані Z_1 за середній цикл регенерації для відповідних моделей, які розроблено в розділі 2.

Приклад 3.4. Нехай повна інтенсивність раптових відмов $\Lambda = 1 \times 10^{-4}$ год $^{-1}$, інтенсивність повторювальних відмов $\theta = 1 \times 10^{-4}$ год $^{-1}$, інтенсивність виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП $\rho = 1 \times 10^{-3}$ год $^{-1}$ і $t_{\text{ЯВ}} = t_{\text{ПВ}} = 1$ год. Значення інтенсивностей явних і прихованих відмов знаходяться з рівняння (2.46). Знайдемо

значення коефіцієнтів готовності K_{Γ} і $K_{\Gamma\text{ДК}}$ для послідовно-паралельної структури для випадку експоненційного закону розподілу напрацювань ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов при різних значеннях повноти контролю.

Таблиця 3.4

Значення коефіцієнтів готовності K_{Γ} і $K_{\Gamma\text{ДК}}$ для послідовно-паралельної структури

n/m	$a = 0,6$		$a = 0,9$	
	K_{Γ}	$K_{\Gamma\text{ДК}}$	K_{Γ}	$K_{\Gamma\text{ДК}}$
2/2	0,921403	0,99993	0,994934	0,999997
2/3	0,984003	0,999992	0,999745	0,9999999963
2/4	0,996786	0,999998	0,999987	0,9999999998

Результати обчислень із табл. 3.4 показують, що значення коефіцієнтів готовності K_{Γ} і $K_{\Gamma\text{ДК}}$ збільшуються зі збільшенням кількості m паралельно з'єднаних з точки зору надійності ЗМ, тобто зі збільшенням резервних ЗМ. Причому готовність системи тим вище, чим більше повнота контролю.

Паралельно-послідовна структура. Нехай система складається із n паралельно з'єднаних з точки зору надійності підсистем. Причому кожна підсистема з номером j ($j = \overline{1, n}$) є послідовною структурою з i ($i = \overline{1, m}$) ЗМ. Коефіцієнт готовності для паралельно-послідовної структури визначається з роботи [5] за формулою:

$$K_{\Gamma\text{ПС}} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^m M[T_{1,i}] / M[T_{0,i}] \right)^n \quad (3.11)$$

де $M[T_{0,ij}]$ – середній цикл регенерації i -го ЗМ будь-якої послідовної підсистеми для відповідних моделей, розроблених в розділі 2; $M[T_{1,ij}]$ – середній час знаходження i -го ЗМ будь-якої послідовної підсистеми у стані Z_1 за середній цикл регенерації для відповідних моделей, розроблених в розділі 2.

Приклад 3.5. Нехай повна інтенсивність раптових відмов $\Lambda = 1 \times 10^{-4}$ год⁻¹, інтенсивність повторювальних відмов $\theta = 1 \times 10^{-4}$ год⁻¹, інтенсивність виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП $\rho = 1 \times 10^{-3}$ год⁻¹ і $t_{\text{ЯВ}} = t_{\text{ПВ}} = 1$ год. Значення

інтенсивностей явних і прихованих відмов знаходяться із рівняння (2.46). Знайдемо значення коефіцієнтів готовності K_{Γ} і $K_{\Gamma\text{ДК}}$ для системи з паралельно-послідовною структурою для випадку експоненційного закону розподілу напрацювань ЗМ до явної, прихованої та повторювальної відмов за різних значеннях повноти контролю.

Як видно з табл. 3.5, значення коефіцієнтів готовності K_{Γ} і $K_{\Gamma\text{ДК}}$ зменшуються зі збільшенням кількості m послідовно з'єднаних з точки зору надійності ЗМ, що призводить до зменшення надійності системи.

Таблиця 3.5

Значення коефіцієнтів готовності K_{Γ} і $K_{\Gamma\text{ДК}}$ для системи з паралельно-послідовною структурою

n/m	$a = 0,6$		$a = 0,9$	
	K_{Γ}	$K_{\Gamma\text{ДК}}$	K_{Γ}	$K_{\Gamma\text{ДК}}$
2/2	0,870105	0,999861	0,990359	0,999989
2/3	0,761376	0,999689	0,979378	0,999977
2/4	0,650808	0,999450	0,965131	0,999959

3.3. Розроблення показників для оцінювання повних експлуатаційних витрат обладнання систем радіозв'язку

Як показано в розділі 1, одним із шляхів підвищення готовності обладнання СРЗ є резервування обладнання та програмного забезпечення. Однак, збільшення кількості апаратних і програмних засобів вимагає додаткових капітальних вкладень і збільшення прямих експлуатаційних витрат.

На основі аналізу відомих показників оцінювання ефективності використання СРЗ, який проведено в розділі 1, для визначення повних експлуатаційних витрат будемо використовувати інтегральний показник ефективності СРЗ – сукупну вартість володіння системою ТСО, який визначається з виразу (1.2) [7]

$$TCO = OPEX \cdot T + CAPEX ,$$

де $OPEX$ – питомі операційні витрати, T – період розрахунку сукупної вартості володіння, $CAPEX$ – капітальні витрати.

Операційні витрати $OPEX$ (Operational Expenditures) розраховуються з урахуванням поточних витрат. При цьому їх можна розділити на дві складові:

- *DOPEX* (Direct Operational Expenditures), які можна розрахувати за даними бухгалтерії, а саме визначивши загальні витрати на заробітну плату, витрати на електроенергію, комунальні витрати, закупівлю обладнання та ПЗ як суму амортизації, яка нараховується на основні фонди;

- *MOPEX* (Maintenance Operational Expenditures), які можуть бути віднесені до експлуатаційних витрат, пов'язаних безпосередньо з процесом технічного обслуговування і ремонту.

У даному розділі буде проводитися оцінювання саме експлуатаційних витрат, які включають в себе вартість простою СРЗ внаслідок явної, прихованої, повторювальної відмов та ПДКП, а також через відсутність запасних ЗМ (ЗЗМ) в обмінному фонді, і вартість відновлення ЗМ, які відмовили.

Капітальні витрати *CAPEX* (Capital Expenditures) розраховуються на основі врахування вартості обладнання (включаючи його монтаж, конфігурацію та необхідне програмне забезпечення) і споруд за балансовою вартістю.

3.3.1. Метод оцінювання повних експлуатаційних витрат для ЗМ. Нехай вартісні витрати при знаходженні ЗМ в станах Z_i ($i = \overline{1, 4}$) представлені дискретним ансамблем

$$C_{\text{ЗМ}} = \begin{Bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \end{Bmatrix}, \quad (3.13)$$

де C_i ($i = \overline{1, 4}$) – питомі середні витрати в одиницю часу, пов'язані з перебуванням ЗМ в станах Z_i ($i = \overline{1, 4}$), у.о./год; p_i ($i = \overline{1, 4}$) – ймовірності знаходження ЗМ в одному зі станів за цикл регенерації.

Ймовірності, які входять у формулу (3.13), визначаються як

$$p_i = \frac{M[T_i]}{M[T_0]}. \quad (3.14)$$

Для визначення повних експлуатаційних витрат будемо враховувати тільки ті стани, які призводять до вартісних витрат на процес експлуатації, тобто стани Z_2 , Z_3 і Z_4 . Тоді операційні витрати при експлуатації ЗМ визначаються за формулою

$$OPEX_{3M} = \sum_{i=2}^4 C_i p_i. \quad (3.15)$$

Капітальні витрати при експлуатації одного основного, n резервних і q запасних ЗМ визначаються за формулою:

$$CAPEX_{3M} = Q + Qn + Qq, \quad (3.16)$$

де Q – вартість одного ЗМ. Тоді повні експлуатаційні витрати визначаються підстановкою виразів (3.15) і (3.16) у (3.12):

$$TCO_{3M} = T \sum_{i=2}^4 C_i p_i + (Q + Qn + Qq). \quad (3.17)$$

3.3.2. Метод оцінювання повних експлуатаційних витрат для системи, яка складається з m ЗМ. Визначення повних експлуатаційних витрат системи необхідно проводити з урахуванням того, що ЗМ резервовані, в разі відмови модуля його заміна на працездатний проводиться не миттєво, при цьому кількість ЗЗМ обмежена. Для цього введемо ще один стан Z_5 – простій системи внаслідок незадоволення вимоги на ЗЗМ. Середній час знаходження системи в цьому стані визначається середнім часом простою системи внаслідок незадоволення вимоги на ЗЗМ за формулою

$$M[T_5] = t_{33M}. \quad (3.18)$$

Тоді середній цикл регенерації для системи визначається за формулою:

$$M[T_0] = \sum_{i=1}^5 M[T_i]. \quad (3.19)$$

Питомі операційні витрати при експлуатації системи, яка складається з m ЗМ, визначаються за формулою математичного сподівання

$$OPEX = m \sum_{i=2}^5 C_i p_i, \quad (3.20)$$

де C_2 – середні витрати в одиницю часу, пов'язані з перебуванням ЗМ в непрацездатному стані внаслідок прихованої відмови, в у.о./год; C_3 – середні витрати в одиницю часу, пов'язані з перебуванням ЗМ в стані відновлення внаслідок повторювальної відмови, в у.о./год; C_4 – середні витрати в одиницю часу, пов'язані з

перебуванням ЗМ в стані відновлення внаслідок явної відмови, в у.о./год; p_i ($i = \overline{1, 5}$) – ймовірності знаходження ЗМ в одному зі станів за цикл регенерації, які визначаються за формулою (3.14).

Якщо обладнання, яке експлуатується, складається із M типів кожен по m основних ЗМ, формула (3.20) має вигляд:

$$OPEX = M m \sum_{i=2}^5 C_i p_i. \quad (3.21)$$

Капітальні витрати при експлуатації системи, яка складається з m основних, n резервних і q запасних ЗМ, визначаються за формулою:

$$CAPEX = \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} + \sum_{l=1}^q Q_{l,k} F_{l,k} \right], \quad (3.22)$$

де M – кількість типів обладнання; $L_{i,k}$ – кількість основних ЗМ одного типу; $N_{j,k}$ – кількість резервних ЗМ одного типу; $F_{l,k}$ – кількість запасних ЗМ одного типу; $Q_{i,k}$ – вартість основного ЗМ; $Q_{j,k}$ – вартість резервного ЗМ; $Q_{l,k}$ – вартість запасного ЗМ.

Тоді повні експлуатаційні витрати визначаються підстановкою виразів (3.21) і (3.22) у (3.12):

$$TCO = M m T \sum_{i=2}^5 C_i p_i + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} + \sum_{l=1}^q Q_{l,k} F_{l,k} \right]. \quad (3.23)$$

3.3.3. Метод оцінювання операційних витрат для систем із різними включеннями з точки зору надійності ЗМ. Крім перерахованих в п. 3.3 складових витрат, на величину повних експлуатаційних витрат СРЗ буде впливати структура включення з точки зору надійності ЗМ і обраний спосіб резервування.

Послідовна структура. Якщо система складається з N послідовно включених з точки зору надійності ЗМ одного типу, ймовірності, які входять в формулу (3.20), будуть визначатися з [1] як

$$p_i = \prod_{j=1}^N M[T_{i,j}] / M[T_{0,j}]. \quad (3.24)$$

Тоді питомі операційні витрати при експлуатації системи, яка складається з m ЗМ, визначаються за формулою

$$OPEX = m \sum_{i=2}^5 \left(C_i \prod_{j=1}^N M[T_{i,j}] / M[T_{0,j}] \right). \quad (3.25)$$

Паралельна структура. Якщо система складається з N однотипних паралельно включених з точки зору надійності ЗМ, ймовірності, які входять в формулу (3.20), будуть визначатися з [5] як

$$p_i = 1 - (1 - M[T_i] / M[T_0])^N. \quad (3.26)$$

Тоді питомі операційні витрати при експлуатації системи, яка складається з m ЗМ, визначаються за формулою

$$OPEX = m \sum_{i=2}^5 \left(C_i \left[1 - (1 - M[T_i] / M[T_0])^N \right] \right). \quad (3.27)$$

Структура « k із m ». Якщо система має структуру « k із m », ймовірності, які входять у формулу (3.20), будуть визначатися із [5] як

$$p_i = \sum_{j=k}^m c_m^j (M[T_i] / M[T_0])^j (1 - M[T_i] / M[T_0])^{m-j}, \quad (3.28)$$

де $c_m^i = \frac{m!}{i!(m-i)!}$ – кількість комбінацій.

Тоді питомі витрати при експлуатації такої системи визначатимемо за формулою

$$OPEX = m \sum_{i=2}^5 \left(C_i \left[\sum_{j=k}^m c_m^j (M[T_i] / M[T_0])^j (1 - M[T_i] / M[T_0])^{m-j} \right] \right). \quad (3.29)$$

Послідовно-паралельна структура. Для такої структури ймовірності, які входять у формулу (3.20), будуть визначатися із [5, 6] як

$$p_i = \prod_{j=1}^N \left(1 - \prod_{k=1}^m (1 - M[T_{i,kj}] / M[T_{0,kj}]) \right), \quad (3.30)$$

де N – кількість послідовно з'єднаних з точки зору надійності підсистем, m – кількість ЗМ в кожній з підсистем.

Тоді питомі операційні витрати при експлуатації системи, яка складається з m ЗМ, визначаються за формулою

$$OPEX = m \sum_{i=2}^5 \left\{ C_i \prod_{j=1}^N \left(1 - \prod_{k=1}^m \left(1 - M[T_{i,kj}] / M[T_{0,kj}] \right) \right) \right\}. \quad (3.31)$$

Паралельно-послідовна структура. Для даної структури ймовірності, які входять у формулу (3.20), будуть визначатися з [5, 6] як

$$p_i = 1 - \left(1 - \prod_{j=1}^m M[T_{i,j}] / M[T_{0,j}] \right)^N, \quad (3.32)$$

де N – кількість послідовно з'єднаних з точки зору надійності підсистем.

Тоді питомі операційні витрати при експлуатації системи, яка складається з m ЗМ, визначаються за формулою

$$OPEX = m \sum_{i=2}^5 \left\{ C_i \left(1 - \left(1 - \prod_{j=1}^m M[T_{i,j}] / M[T_{0,j}] \right)^N \right) \right\}. \quad (3.33)$$

3.4. Методи оцінювання повних експлуатаційних витрат в періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування обладнання СРЗ.

Як було відзначено в розділі 1, виробники обладнання СРЗ, як правило, забезпечують його гарантійне обслуговування протягом 3-х років. У цей період усунення всіх несправностей, ремонт та оновлення програмного забезпечення здійснюється за рахунок постачальника обладнання СРЗ. Після закінчення цього терміну власник обладнання або оплачує всі витрати на підтримку процесу експлуатації (усуває всі несправності самостійно, оплачує окремо послуги із заміни несправних ЗМ, відновленню й оновленню ПЗ), або підписує договір на сервісне технічне обслуговування і вносить періодичну плату за певну програму післягарантійного сервісного обслуговування [8, 9].

Таким чином, експлуатаційні витрати власника обладнання СРЗ в період гарантійного сервісного обслуговування й в післягарантійний період можуть істотно відрізнятися. Розглянемо особливості визначення експлуатаційних витрат в кожен з цих періодів.

В період гарантійного терміну обслуговування (ГТО) усунення всіх несправностей і оновлення програмного забезпечення здійснюється за рахунок

постачальника обладнання СРЗ. Оскільки кожен ЗМ має гарантію постачальника, його відновлення для власника буде безкоштовним. Однак, стандартна гарантія (наприклад, стандартна гарантія Huawei Technology) не передбачає ремонт на території замовника та авансову заміну ЗМ, причому оновлення ПЗ і заміна компонентів гарантуються протягом 60 днів. Тому можливі простой СРЗ через відсутність запасного ЗМ. Крім того, упаковка і транспортування модулів в сервісний центр виконується за рахунок власника обладнання СРЗ.

Таким чином, очікувані операційні витрати власника обладнання СРЗ для сукупності нерезервованих ЗМ, які знаходяться на гарантії постачальника, визначаються з урахуванням формули (3.21) з виразу

$$OPEX = M m T \left\{ C_{\text{ПДКП}} \frac{M[T_2]}{M[T_0]} + (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) \left(\frac{M[T_3]}{M[T_0]} + \frac{M[T_4]}{M[T_0]} \right) + C_{\text{ЗЗМ}} \frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right\}, \quad (3.34)$$

де m – кількість експлуатованих ЗМ, які мають гарантії в період ГТО; $C_{\text{ПДКП}}$ – вартість простою обладнання через проведення ПДКП; $C_{\text{ДМ}}$ – вартість робіт по монтажу/демонтажу ЗМ i -го типу; $C_{\text{ТР}}$ – вартість транспортування ЗМ i -го типу в сервісний центр для ремонту і назад; $C_{\text{ЗЗМ}}$ – вартість простою обладнання через відсутність запасних ЗМ i -го типу; $M[T_0]$ – середній цикл регенерації, який визначається за формулою (3.19); $M[T_2]/M[T_0]$, $M[T_3]/M[T_0]$, $M[T_4]/M[T_0]$ і $M[T_5]/M[T_0]$ – ймовірності знаходження ЗМ в станах непрацездатності, відновлення і простою через відсутність ЗЗМ відповідно.

Вирази $M[T_1]$, $M[T_2]$, $M[T_3]$ і $M[T_4]$, які входять до формул (3.19) і (3.34), визначаються з (2.64), (2.68), (2.70) та (2.75) в разі довільного розподілу напрацювання ЗМ до відмови та з (2.77), (2.79), (2.81) і (2.83) в разі експоненційного розподілу напрацювання ЗМ до відмови (Модель 3).

У разі визначення операційних витрат в період ГТО для систем з різним з точки зору надійності включенням ЗМ, а також при різних видах резервування, ймовірності, які входять у формулу (3.34), будуть визначатися з урахуванням виразів (3.24), (3.26), (3.28), (3.30) і (3.32) відповідно.

Капітальні витрати власника обладнання СРЗ, приведені на початок гарантійного терміну експлуатації, визначаються як

$$CAPEX = \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right]. \quad (3.35)$$

Підставляючи формули (3.34) і (3.35) у вираз (3.12), отримаємо формулу для розрахунку повних експлуатаційних витрат для сукупності нерезерованих ЗМ для періоду гарантійного обслуговування:

$$TCO = M m T \left\{ C_{\text{ПДКП}} \frac{M[T_2]}{M[T_0]} + (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) \left(\frac{M[T_3]}{M[T_0]} + \frac{M[T_4]}{M[T_0]} \right) + C_{\text{ЗЗМ}} \frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right\} + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right]. \quad (3.36)$$

Експлуатаційні витрати резервованого обладнання СРЗ, яке складається з m основних і n резервних ЗМ, будуть визначатися з виразу:

$$TCO = M T \sum_{i=1}^m \left[C_{\text{ПДКП}} \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^{n_i} + C_{\text{ЗЗМ}} \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^{n_i} \right] + (m+n)(C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) \left(\frac{M[T_3] + M[T_4]}{M[T_0]} \right) + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right]. \quad (3.37)$$

В період післягарантійного терміну обслуговування (ПГТО) основний вплив на експлуатаційні витрати буде мати вартість додатково резервованих і запасних ЗМ внаслідок їхньої великої вартості. Вартість оперативного ТО буде визначається вартістю робіт по демонтажу забракованого ЗМ і монтажу запасного ЗМ, витратами на відновлення ЗМ в сервісному центрі постачальника, а також вартістю простою обладнання через відсутність запасних ЗМ. Таким чином, повні експлуатаційні витрати в період ПГТО для нерезерованих ЗМ будуть визначатися з виразу:

$$TCO = M m T \left\{ C_{\text{ПДКП}} \frac{M[T_2]}{M[T_0]} + (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}} + C_{\text{ВІД}}) \left(\frac{M[T_3]}{M[T_0]} + \frac{M[T_4]}{M[T_0]} \right) + C_{\text{ЗЗМ}} \frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right\} + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} + \sum_{l=1}^q Q_{l,k} F_{l,k} \right], \quad (3.38)$$

де m – кількість експлуатованих ЗМ, які не мають гарантії в період ПГТО, $C_{\text{ВІД}}$ – середня вартість відновлення ЗМ в сервісному центрі постачальника.

Експлуатаційні витрати резервованого обладнання СРЗ, яке складається з m основних і n резервних ЗМ будуть визначатися з виразу

$$TCO = MT \sum_{i=1}^m \left[C_{\text{ПДКП}} \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^{n_i} + C_{\text{ЗЗМ}} \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^{n_i} \right] + (3.39)$$

$$+ (m+n)(C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}} + C_{\text{ВІД}}) \left(\frac{M[T_3]}{M[T_0]} + \frac{M[T_4]}{M[T_0]} \right) + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right].$$

Вирази $M[T_1]$, $M[T_2]$, $M[T_3]$ і $M[T_4]$, які входять у формулу (3.39), визначаються з (2.11), (2.17), (2.21) і (2.28) для Моделі 1 або з (2.11), (2.21), (2.28) і (2.56) для Моделі 2 в разі довільного розподілу напрацювання ЗМ до відмови; з (2.36), (2.38), (2.40) і (2.42) для Моделі 1 або з (2.36), (2.40), (2.42) і (2.60) для Моделі 2 в разі експоненційного розподілу напрацювання ЗМ до відмови.

Залежно від включення ЗМ з точки зору надійності, а також при різних видах резервування, ймовірності, які входять в формулу (3.37), будуть визначатися з урахуванням виразів (3.24), (3.26), (3.28), (3.30) і (3.32) відповідно.

В разі укладення договору на одну з програм сервісного післягарантійного обслуговування величина $C_{\text{ВІД}}$ буде визначатися як середня питома вартість абонентського річного обслуговування, яка припадає на обслуговування даного ЗМ. Приклад програм сервісного обслуговування, за якими можна визначити $C_{\text{ВІД}}$, наведені в табл. 3.6 [8].

Таблиця 3.6

Програми післягарантійного обслуговування компанії Huawei Technology Ltd.

Тариф		Віддалена підтримка	Заміна обладнання	Підтримка на об'єкті замовника	Вартість
1		2	3	4	5
1.	Базовий	7×24 «Гаряча лінія»; 5×8 Віддалена техпідтримка	5×8×NBD-s відправка з центру наступний робочий день	Не передбачено	$C_{\text{ВІД},1,i}$

Продовження табл. 3.6

1	2	3	4	5	
2.	Стандартний	7×24 «Гаряча лінія»; 5×8 Віддалена техпідтримка	5×8×NBD авансова заміна на наступний робочий день	5×8×NBD (додатково)	$C_{\text{ВІД},2,i}$
3.	Розширений	7×24 «Гаряча лінія»; 7×24 Віддалена техпідтримка	5×8×4 авансова заміна протягом 4-х годин (в робочі години)	5×8×4 (додатково)	$C_{\text{ВІД},3,i}$
4.	Преміум	7×24 «Гаряча лінія»; 7×24 Віддалена техпідтримка	7×24×4 авансова заміна протягом 4-х годин (7 днів на тиждень, цілодобово)	7×24×4 (додатково)	$C_{\text{ВІД},4,i}$

Як видно з табл. 3.6, типи обслуговування та їхні вартості можуть істотно змінюватися, що впливає на експлуатаційні витрати. Конкретні вартості кожного тарифу визначаються безпосередньо за контрактом.

3.4.1. Визначення прийняттого варіанту експлуатаційного резервування і кількості запасних ЗМ обладнання СРЗ в період гарантійного терміну обслуговування. Вибір прийняттого варіанту в період ГТО будемо проводити із вирішення прямої задачі за критерієм:

$$\begin{aligned} & \max_{n,q} K_{\text{ГК}}(n,q) \\ & \text{при } TCO(n,q) \leq TCO_{\text{доп}}, \end{aligned} \quad (3.40)$$

а також із вирішення оберненої задачі за критерієм:

$$\begin{aligned} & \min_{n,q} TCO(n,q) \\ & \text{при } K_{\text{ГК}}(n,q) \geq K_{\text{ГК},\text{доп}}, \end{aligned} \quad (3.41)$$

де n, q – кількість резервних і запасних ЗМ відповідно; $TCO(n, q)$ – значення повних експлуатаційних витрат в період ГТО, які розраховуються за формулою (3.36), $TCO_{\text{доп}}$ – допустиме значення повних експлуатаційних витрат в період ГТО,

$K_{\text{ГК},\text{доп}}$ – допустиме значення КГ на кінцевому інтервалі експлуатації.

Для різних з точки зору надійності структур при довільному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови значення КГ, який входить у формули (3.40) і (3.41), визначаються з наступних виразів: для послідовної структури – з (3.1), для паралельної структури – з (3.5), для структури « k із m » – з (3.9), для послідовно-паралельної структури – з (3.10), для паралельно-послідовної структури – з (3.11) для Моделі 3.

При експоненційному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови КГ визначається з наступних виразів: для послідовної структури – із (3.4), для паралельної структури – із (3.8).

3.4.2. Вибір прийняттого варіанту експлуатаційного резервування і кількості запасних ЗМ обладнання СРЗ в період післягарантійного терміну обслуговування. Вибір прийняттого варіанту в період ПГТО будемо проводити із вирішення прямої задачі за критерієм:

$$\begin{aligned} & \max_{n,q} K_{\Gamma}(n,q) \\ & \text{або } \max_{n,q} K_{\Gamma\text{ДК}}(n,q) \\ & \text{за умови що } TCO(n,q) \leq TCO_{\text{доп}}, \end{aligned} \quad (3.42)$$

а також із вирішення оберненої задачі за критерієм:

$$\begin{aligned} & \min_{n,q} TCO(n,q) \\ & \text{за умови що } K_{\Gamma}(n,q) \geq K_{\Gamma,\text{доп}} \\ & \text{або за умови що } K_{\Gamma\text{ДК}}(n,q) \geq K_{\Gamma\text{ДК},\text{доп}}, \end{aligned} \quad (3.43)$$

де $TCO(n, q)$ – значення повних експлуатаційних витрат в період ГТО, які розраховуються за формулою (3.37), $TCO_{\text{доп}}$ – допустиме значення повних експлуатаційних витрат в період ПГТО, $K_{\Gamma,\text{доп}}$ – допустиме значення КГ на нескінченному інтервалі експлуатації для Моделі 1, $K_{\Gamma\text{ДК},\text{доп}}$ – допустиме значення КГ на нескінченному інтервалі експлуатації для Моделі 2.

Для різних структур СРЗ при довільному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови значення КГ, який входить у формули (3.42) і (3.43), визначаються з

наступних виразів: для послідовної структури – з (3.1), для паралельної структури – з (3.5), для структури « k із m » – з (3.9), для послідовно-паралельної структури – з (3.10), для паралельно-послідовної структури – з (3.11) для Моделі 1 і Моделі 2.

При експоненційному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови КГ визначається з наступних виразів: для послідовної структури – з (3.2) для Моделі 1 і з (3.3) для Моделі 2, для паралельної структури – з (3.6) для Моделі 1 і з (3.7) для Моделі 2.

3.5. Висновки

1. Розроблено математичні моделі ТО резервованого обладнання СРЗ, охопленого безперервним контролем працездатності, які враховують структуру систем з точки зору надійності. Проведено дослідження виразів для розрахунку коефіцієнтів готовності кожної структури при експоненційному законі розподілу напрацювання ЗМ до відмови і проілюстровано, що готовність резервованого обладнання СРЗ має істотну залежність від обраної структури резервування та повноти контролю.

2. Розроблено показники для оцінки експлуатаційних витрат резервованих систем радіозв'язку. В якості інтегрального показника ефективності СРЗ обрана сукупна вартість володіння системою ТСО. Виведено співвідношення (3.17) і (3.23), які дозволяють оцінити повні експлуатаційні витрати ЗМ і системи в цілому відповідно.

3. Проведено дослідження впливу на повні експлуатаційні витрати структури включення ЗМ з точки зору надійності та обраного способу резервування. Отримано вирази (3.25), (3.27), (3.29), (3.31) і (3.33) для оцінки оперативних витрат для послідовної, паралельної, змішаних структур і структури « k із m ».

4. Виведено співвідношення (3.36) – (3.39), які дозволяють оцінити повні експлуатаційні витрати в періоди гарантійного і післягарантійного термінів сервісного обслуговування відповідно з урахуванням кількості резервних і запасних ЗМ.

5. Виведено співвідношення (3.40) – (3.43), які дозволяють обрати прийнятний варіант експлуатаційного резервування і кількості запасних ЗМ обладнання СРЗ в

періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування із розв'язання прямої задачі знаходження максимуму коефіцієнта готовності при допустимому значенні повних експлуатаційних витрат і з розв'язання оберненої задачі знаходження мінімуму повних експлуатаційних витрат при допустимому значенні коефіцієнта готовності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мачалін І. О., Луцеїн В. І., Терентьева І. Є. Показники ефективності експлуатації апаратури сучасних мереж передачі даних. Захист інформації. – 2005. – № 4. – С.68–72.
2. Терентьева И. Е., Пузыренко А. Ю. Повышение защищенности информационно-коммуникационных систем на основе структурной избыточности. ITSEC: Безпека інформаційних технологій: III між нар. наук. конф., 21–24 травня 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 56.
3. Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Комбинированные методы резервирования оборудования телекоммуникационных систем. Проблемы розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: наук.-техн. конф., 28–30 листопада 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 44.
4. Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Повышение качества услуг интегральных телекоммуникационных систем на основе повышения уровня надежности. Проблемы навігації і управління рухом: наук.-практ. конф., 28–29 листопада 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 102.
5. Уланский В. В., Конахович Г. Ф., Мачалин И. А. Организация системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного комплекса самолета ТУ-204. – Киев: КИИГА, 1992. – 69 с.
6. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
7. BARLOW R., PROSHAN F. MATHEMATICAL THEORY OF RELIABILITY. – NEW YORK: JOHN WILEY, 1996. – 258 P.
8. Минухин С. В. Методика выбора и расчет затрат совокупной стоимости

владения вычислительным кластером. – Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – №1(49). – С. 90–96.

9. Warranty Policy for Network, Secospace and UC&C. [Електронний ресурс]. URL: <http://support.huawei.com/enterprise/#tabname=serSolveProject> (дата звернення: 15.01.16).

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ГОТОВНОСТІ, ПОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ І ВИЗНАЧЕННЯ ПРИЙНЯТНОГО ВАРІАНТУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РЕЗЕРВУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

4.1. Особливості побудови обладнання сучасних систем радіозв'язку

Розглянемо особливості побудови сучасних систем радіозв'язку на прикладі обладнання комунікаційної платформи U-SYS компанії Huawei Technologies Co., Ltd. (КНР). Обладнання платформи U-SYS використовується для побудови мультисервісних мереж CP3 на базі концепції програмного комутатора Mobile SoftSwitch Center, ядром яких є опорні IP-мережі, які підтримують повну або часткову інтеграцію послуг передачі мовлення, даних і мультимедіа і реалізують принцип конвергенції послуг електрозв'язку [1, 2].

Як представлено в [1, 2], на рівні управління пакетною комутацією використовується наступне обладнання комунікаційної платформи U-SYS:

- *Програмний комутатор для мобільної мережі радіозв'язку MSoftx3000 (MSoftSwitch)* призначений для управління обладнанням і викликами в мережі мобільного зв'язку. Він забезпечує конвергенцію мереж мобільного радіозв'язку покоління 2G та 3G та підтримує мережеві схеми GSM, 3GPP R99, 3GPP R4 та 3GPP R5.

На рівні доступу в CP3 використовується наступне обладнання комунікаційної платформи U-SYS [1, 2]:

- *Універсальний медіашлюз UMG8900 (Universal Media Gateway)* забезпечує підключення контролера базової станції BSC (Base Station Controller), телефонної станції ТМЗК, корпоративної телефонної станції УАТС (PBX), мережі доступу (AN), сервера мережі доступу NAS (Network Access Server) і виконує перетворення різних форматів медіапотоків і сигналізації в режимах ТМГ, вбудованого SG або AMG.

- 2. *Шлюз мультисервісного доступу UA5000 (Universal Access)* забезпечує мультисервісний широкосмуговий доступ.

На рис. 4.1 показано типову мережеву модель СМРЗ із використанням обладнання комунікаційної платформи U-SYS для 3GPP R4.

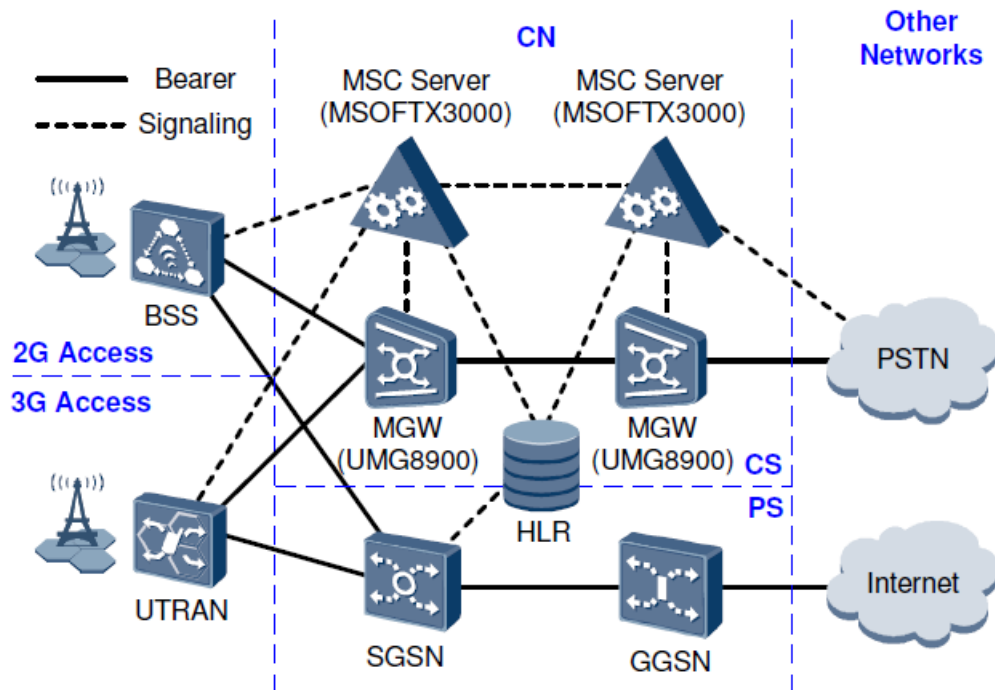


Рис. 4.1 Типова мережева модель СМРЗ для 3GPP R4: BSS – підсистема базових станцій, UTRAN – мережа наземного радіодоступу UMTS, CN – ядро мережі, MSC – сервер мобільної комутації, MGW – медіашлюз, SGSN – вузел підтримки послуг GPRS, GGSN – шлюз підтримки GPRS, HLR – реєстр місцезнаходження, CS – каналний комутатор, PSTN – ТМЗК, PS – пакетний комутатор [2]

4.2. Особливості забезпечення надійності та готовності обладнання СРЗ

Як показано в п. 4.1, обладнання сучасних СРЗ складається з великої кількості окремих пристроїв (контролерів, шлюзів, серверів). При цьому місце традиційних вузлів комутації займають програмні комутатори MSoftswitch, які є центральними вузлами мережі СРЗ і керують багатьма пристроями. Також одним з важливих елементів мережі виступає вузол мультисервісного широкосмугового доступу UA5000 [1, 3].

Оскільки для роботи всієї СРЗ необхідна спільна робота окремих пристроїв, від надійності даного обладнання залежить готовність і якість (QoS) всієї системи радіозв'язку. У свою чергу, надійність обладнання залежить від надійності елементів або модулів, з яких воно складається. Як показано в роботі [4], попри

високі коефіцієнти готовності кожного елемента, які заявлені виробниками обладнання, результуюча надійність СРЗ буде дорівнювати добутку коефіцієнтів готовності всіх її пристроїв, тобто в результаті виявляється нижчою.

Для збільшення надійності й готовності СРЗ широко застосовуються методи апаратного і програмного резервування ЗМ, в тому числі з географічним рознесенням, що призводить до великих фінансових витрат власників обладнання. Для зниження експлуатаційних витрат при заданому коефіцієнті готовності необхідно оптимізувати кількість резервних і запасних елементів або модулів обладнання СРЗ.

В рамках даного дослідження методики оцінювання готовності СРЗ та експлуатаційних витрат будуть розроблятися на прикладі гнучкого комутатора MSoftX3000 і вузла мультисервисного широкосмугового доступу UA5000. Розглянемо більш докладно архітектуру означеного обладнання.

4.2.1. Програмний комутатор MSoftX3000. Структура апаратних засобів MSoftX3000, яка показана на рис. 4.2, складається з касети OSTA [4], комутаторів LAN, модуля обслуговування і управління даними BAM (Back Administration Module) і інтегрованого білінгового шлюзу iGWB.

Касети OSTA утворюють головну систему MSoftX3000, яка керує ресурсами і обробкою послуг; BAM і iGWB є серверами системи, які відповідають за експлуатацію і технічне обслуговування O & M і управління квитанціями. Комутатори LAN забезпечують взаємодію касет OSTA між собою і між BAM і iGWB через внутрішню мережу FE (FastEthernet) [1–3].

Платформа OSTA розміщується в стандартній касеті. Конструктивно касети розташовуються в стандартних шафах в стативах. При повній комплектації потрібно 5 шаф. Всі полиці MSoftX3000 мають однакову архітектуру обладнання. Кожна полиця складається з 21 стандартного слота, в яких можуть розміщуватися 17 передніх і 16 задніх плат. Плати встановлюються відповідно до рис. 4.3 і табл. 4.1 [1–4].

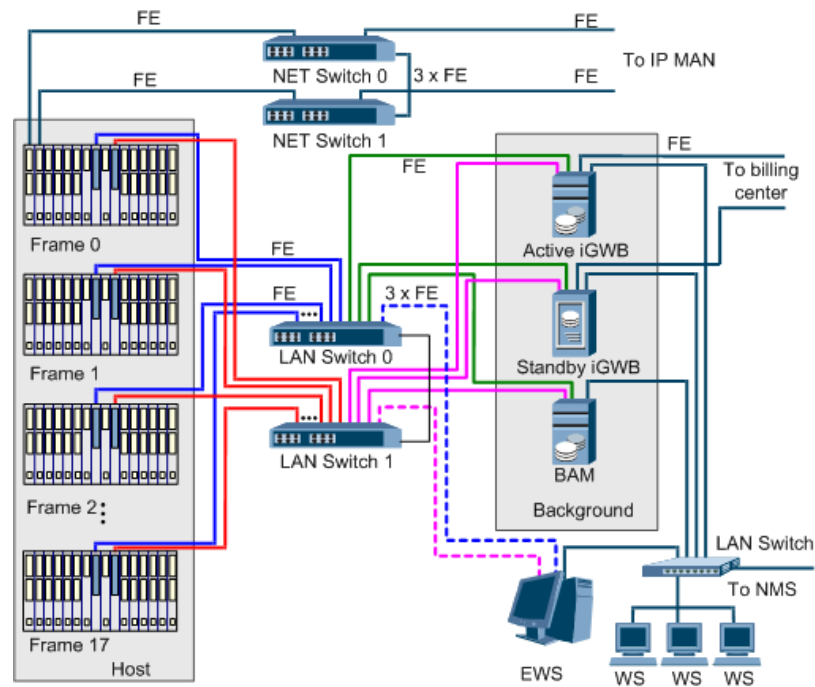


Рис. 4.2 Архітектура MSoftX3000 з окремим підключенням BAM і iGWB: WS – робоча станція; EWS – аварійна робоча станція; MAN – міська мережа; NMS – система управління мережею [1]

Передніми платами касети OSTA є плати послуг, плати управління системою і плати аварійної сигналізації, а задніми платами – інтерфейсні плати і плати зв'язку Ethernet. Плати живлення можуть встановлюватися або спереду, або ззаду. Такий спосіб установки дозволяє відокремити функції передніх плат від функцій задніх плат, що спрощує розроблення плат і уніфікує їхні функції. В результаті мінімізується складність апаратних засобів і підвищується надійність системи. Крім того, даний спосіб установки плат збільшує їхню універсальність і підвищує гнучкість конфігурації системи [2–4].

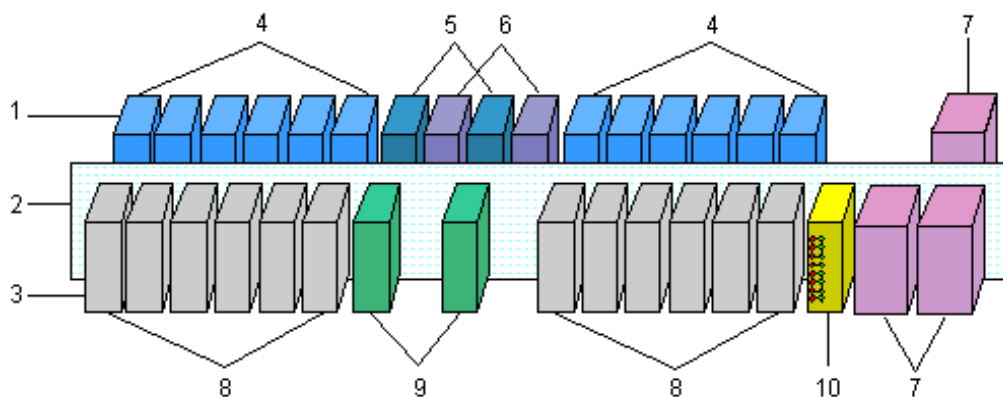


Рис. 4.3 Структурна схема касети OSTA [4]

Таблиця 4.1

Розташування плат касети OSTA

1 – задні плати	2 – шина розділення	3 – передні плати	4 – плати зовнішнього інтерфейсу	5 – плати системного інтерфейсу SIUI
6 – плати навантаженого резервування і керування HSCI	7 – Плати живлення, які мають ширину двох стандартних слотів плат UPWR	8 – плати послуг	9 – плати керування системою SMUI	10 – плати аварійної сигналізації ALUI

Залежно від конфігурації плат касети можуть бути базовими, касетами розширення і касетами медіаресурсів. В якості приклада розглянемо базову касету 0, яка встановлюється на фіксованій позиції статива і забезпечує IP інтерфейс, управління і обробку всіх сервісів. На рис. 4.4 показана конфігурація плат базової касети 0. Крім обов'язкових плат SMUI, SIUI, HSCI, ALUI і UPWR, які займають фіксовані слоти, базова касета 0 також конфігурується платами IFMI/BFII, які забезпечують IP інтерфейс, центральними платами даних CDBI, платами управління фіксованим зв'язком FCCU, платами обробки широкосмугового сигналізації BSGI і платами обробки мультимедійної сигналізації MSGI [2].

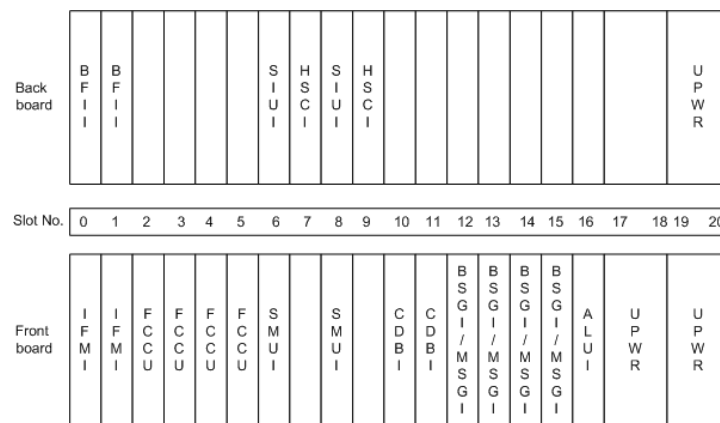


Рис. 4.4 Розташування плат в базовій касеті 0 [1]

Базова касета 1 встановлюється в разі, якщо число абонентів перевищує 500 тис. Для кожних додаткових 500 тис. абонентів базова касета 1 конфігурується додатково двома платами IFMI. Якщо кількість абонентів перевищує 1 млн., базова

касета 1 конфігурується додатково двома платами CDBI. Базова касета 1 забезпечує розширений IP інтерфейс і функції обробки сервісів [2].

Максимально програмний комутатор MSoftX3000 може бути налаштований чотирма парами плат IFMI і двома парами плат CDBI. Виходячи з цього, для всієї системи потрібно одна базова касета 0 і одна базова касета 1.

4.2.2. Шлюз мультисервисного широкосмугового доступу UA5000.

Устаткування UA5000 створено з використанням принципу структури «ведучий/підпорядкований» і містить конструктивні одиниці – полиці, які працюють зі спільним використанням ресурсів для забезпечення максимальної ємності доступу. У UA5000 можуть використовуватися полиці чотирьох типів, які монтуються в стативах різних типів в залежності від вимог до монтажу та умов експлуатації [1, 2].

Стативи і полиці обладнання UA5000 дозволяють встановлювати змішані набори лінійних плат для надання послуг передачі мовлення, даних і відео на базі єдиної платформи. Полиці з доступом з заднього боку статива діляться на два види: НАВА (головна полиця) і НАВВ (підпорядкована полиця). Полиці з фронтальним доступом діляться на чотири типи: НАВД (головна полиця), НАВЕ (підпорядкована полиця), НАВФ (полиця розширення) і НАВЛ (малогабаритна головна полиця) [1].

Зупинимося докладніше на архітектурі полки з доступом з заднього боку статива. Полиця НАВА – це керуюче ядро шлюзу UA5000, яке здійснює конвергенцію потоків даних, які надходять від вбудованих полиць. Вона має 36 слотів, з яких 30 призначені для лінійних плат, але також допускається змішана установка вузькосмугових і широкосмугових лінійних плат. На рис. 4.5 представлена архітектура полиці НАВА з наступними платами: PWX – вторинна плата електроживлення; xPMB – плата управління широкосмуговими інтерфейсами (APMB/IPMB); PVx – плата управління вузькосмуговими інтерфейсами (PVU8/PVU4/PVM); RSUx – віддалений абонентський блок (RSU8/RSU4); AIUB – інтерфейсна плата ATM; xSL - лінійна плата (ASL/DSL/ADBМ/VDLB/ ...); TSSB – плата тестування [1].

Полиця НАВВ працює під управлінням полки НАВА, яка розширює шину для полки НАВВ з метою управління. Дві плати управління широкосмуговими

інтерфейсами на полиці НАВВ працюють в режимі навантаженого резерву. Полку НАВВ обладнана 36 слотами, з яких 32 слота призначені для лінійних плат, а плати управління вузькосмуговими інтерфейсами відсутні. Допускається змішана установка вузькосмугових і широкосмугових лінійних плат. Схема компонування полки НАВВ зображена на рис. 4.6 [1, 2].

Вентилятор																	
00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17
P	P	A	A	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
W	W	P	P	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X	X	S	S	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Область разводки кабелей																	
Вентилятор																	
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Область разводки кабелей																	

Рис. 4.5 Розташування плат в
полиці НАВА [1]

Fan																	
00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17
P	P	x	x	P	P	A	A	x	x	x	x	x	x	x	x	x	T
W	W	P	P	V	V	I	I	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
X	X	M	M	x	x	U	U	L	L	L	L	L	L	L	L	L	B
Cable routing area																	
Fan																	
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Cable routing area																	

Рис. 4.6 Розташування плат в
полиці НАВВ [1]

4.3. Методика оцінювання готовності обладнання СРЗ

Вихідні дані для оцінювання готовності обладнання програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000 наведені в табл. 4.2 із розрахунку на 2 млн. абонентів. Середні значення інтенсивностей явних, прихованих і повторювальних відмов однотипних ЗМ, які подано в таблиці, отримані з розділів "Reliability" технічних описів обладнання компанії Huawei Technologies [4]. Середня вартість ЗМ визначена проведеним аналізом цін на ринку пропозицій з продажу даного обладнання [5, 6].

Для забезпечення високої готовності обладнання MSoftX3000 і UA5000 має розподілену модульну структуру, в якій модулі не залежать один від іншого; також застосовується надлишкова конфігурація лінійних плат керування та обробки сервісів, процесорів, блоків живлення; використовується навантажено (hot standby) резервування; застосовується загальне географічне резервування.

Таблиця 4.2

Вихідні дані для оцінювання готовності обладнання СМРЗ

Найменування ЗМ	Інтенсивність явних відмов (μ), 10^{-6} год $^{-1}$	Інтенсивність повторювальних відмов (θ), 10^{-5} ч $^{-1}$	Середня вартість ЗМ, у. о.	Кількість ЗМ (m/n/q), шт.
1.Плати касети OSTA:				
FCCU	7,1	14,2	800	4/4/1
IFMI/BFII	5,56	11,12	225	4/4/1
SMUI/SIUI	5,56	11,12	225	4/2/1
BSGI	5,6	11,2	225	6/2/1
MSGI	5,6	11,2	225	6/2/1
CDBI	5	10	300	2/2/0
ALUI	6,5	13	37	2/0/0
UPWR	6,67	13,34	37	4/2/1
HSCI	5,56	11,12	225	3/1/1
2.Комутатор LAN	11,1	22,2	800	2/0/0
3. BAM	5,6	11,2	10100	2/0/0
4. iGWB	5,6	11,2	20500	1/1/0
5.Полки NABA і NABB:				
PWX	6,67	13,34	40	4/0/1
xPMB	5,56	11,12	230	1/1/0
PVx	5,56	11,12	230	1/1/0
RSUx	6,2	12,4	230	1/1/0
AIUB	5,56	11,12	200	1/1/0
Xsl	7,1	14,2	200	57/2/2
TSSB	7,1	14,2	300	1/0/0

Наприклад, ЗМ SMUI, FCCU, CDBI і iGWB мають по два процесори, один з яких активний, а інший знаходиться в навантаженому (hot standby) підключенні. При нормальних умовах активний процесор працює, а запасний синхронізується з основним в реальному часі. При відмові основного процесора запасний включається в роботу без переривання сервісів. Також в MSoftX3000 застосовується функціональне мажоритарне навантажене резервування [5, 6].

Наведена нижче методика оцінювання готовності обладнання мережі NGN ґрунтується на математичних моделях, розроблених в розділі 2 для випадку

експоненційного закону розподілу напрацювань зйомних модулів до явних, прихованих і повторювальних відмов.

Методика оцінювання готовності обладнання СРЗ:

1. Визначаємо інтенсивність прихованих відмов λ ЗМ в залежності від повноти контролю a за формулою (2.44):

$$\lambda = \mu \frac{1-a}{a}.$$

2. Проводимо оцінювання коефіцієнтів готовності нерезервованих ЗМ обладнання програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000. Коефіцієнт готовності для i -го однотипного ЗМ визначається за формулою (2.2):

$$K_{\Gamma,i} = \frac{M[T_{1,i}]}{M[T_{1,i}] + M[T_{2,i}] + M[T_{3,i}] + M[T_{4,i}]},$$

де середній час знаходження ЗМ в станах $M[T_1], \dots, M[T_4]$ визначається з виразів (2.35), (2.37), (2.39) і (2.41) для Моделі 1; (2.35), (2.59), (2.39) і (2.41) для Моделі 2; (2.77), (2.79), (2.81) і (2.83) для Моделі 3 відповідно.

3. Проводимо оцінювання КГ нерезервованого обладнання програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000 з послідовним з точки зору надійності включенням. Коефіцієнт готовності $K_{\Gamma S}$ для послідовної з точки зору надійності структури визначається за формулою (3.2) для Моделі 1

$$K_{\Gamma S} = \prod_{i=1}^m \frac{\mu_i + \theta_i}{(\mu_i + \lambda_i + \theta_i)(1 + t_{\text{ЯВ},i}\mu_i) + \theta_i [t_{\text{ПВ},i}(\mu_i + \theta_i) + t_{\text{ЯВ},i}\lambda_i]},$$

за формулою (3.3) для Моделі 2

$$K_{\Gamma \text{ДКС}} = \prod_{i=1}^m \frac{(\mu_i + \theta_i)(\mu_i + \theta_i + \rho_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \rho_i)}{(\mu_i + \theta_i + \rho_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \rho_i) [(\mu_i + \theta_i)(1 + \theta_i t_{\text{ПВ},i}) + t_{\text{ЯВ},i}(2\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \lambda_i \theta_i)] + \lambda_i(\mu_i + \theta_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i)}$$

$$K_{\Gamma \text{ДКС}} = \prod_{i=1}^m \frac{(\mu_i + \theta_i)(\mu_i + \theta_i + \rho_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \rho_i)}{(\mu_i + \theta_i + \rho_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \rho_i) [(\mu_i + \theta_i)(1 + \theta_i t_{\text{ПВ},i}) + t_{\text{ПВ},i}(2\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \lambda_i \theta_i)] + \lambda_i(\mu_i + \theta_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i)}$$

і за формулою (3.4) для Моделі 3

$$K_{\text{ГКС}} = \prod_{i=1}^m \frac{\lambda_i y_i (\lambda_i z_i [1 + T_i x_i] - e^{-\lambda_i T_i} y_i + x_i)}{\lambda_i y_i (\lambda_i z_i [1 + T_i x_i] - e^{-\lambda_i T_i} y_i + x_i + \theta_i x_i [1 - z_i] [t_{\text{ПВ},i} - t_{\text{ЯВ},i}] + t_{\text{ЯВ},i} x_i y_i) + \lambda_i^2 x_i (1 - z_i (1 + T_i y_i)) - y_i^2 m_i (1 - e^{-\lambda_i T_i}) (\lambda_i x_i T_i + (\lambda_i - \mu_i - \theta_i)) + \lambda_i^3 (1 - z_i) - z_i x_i y_i (T_i \lambda_i x_i + y_i)}$$

де $x_i = (\mu_i + \theta_i)$, $y_i = (\mu_i + \lambda_i + \theta_i)$, $z_i = e^{-y_i T_i}$ і $m_i = e^{-x_i T_i}$.

4. Проводимо оцінювання КГ резервованих ЗМ обладнання програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000.

Для дубльованих ЗМ в навантаженому резерві КГ для паралельної структури визначається за формулою (3.6) для Моделі 1

$$K_{\text{ГР}} = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \frac{\mu_i + \theta_i}{(\mu_i + \lambda_i + \theta_i)(1 + t_{\text{ЯВ},i} \mu_i) + \theta_i [t_{\text{ПВ},i} (\mu_i + \theta_i) + t_{\text{ЯВ},i} \lambda_i]} \right),$$

за формулою (3.7) для Моделі 2

$$K_{\text{ГДКР}} = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \frac{(\mu_i + \theta_i)(\mu_i + \theta_i + \rho_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \rho_i)}{(\mu_i + \theta_i + \rho_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \rho_i) [(\mu_i + \theta_i)(1 + \theta_i t_{\text{ПВ},i}) + t_{\text{ЯВ},i} (2\mu_i + \lambda_i + \theta_i + \lambda_i \theta_i)] + \lambda_i (\mu_i + \theta_i)(\mu_i + \lambda_i + \theta_i)} \right),$$

за формулою (3.8) для Моделі 3:

$$K_{\text{ГКР}} = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \frac{\lambda_i y_i (\lambda_i z_i [1 + T_i x_i] - e^{-\lambda_i T_i} y_i + x_i)}{\lambda_i y_i (\lambda_i z_i [1 + T_i x_i] - e^{-\lambda_i T_i} y_i + x_i + \theta_i x_i [1 - z_i] [t_{\text{ПВ},i} - t_{\text{ЯВ},i}] + t_{\text{ЯВ},i} x_i y_i) + \lambda_i^2 x_i (1 - z_i (1 + T_i y_i)) - y_i^2 m_i (1 - e^{-\lambda_i T_i}) (\lambda_i x_i T_i + (\lambda_i - \mu_i - \theta_i)) + \lambda_i^3 (1 - z_i) - z_i x_i y_i (T_i \lambda_i x_i + y_i)} \right),$$

де $x_i = (\mu_i + \theta_i)$, $y_i = (\mu_i + \lambda_i + \theta_i)$, $z_i = e^{-y_i T_i}$ і $m_i = e^{-x_i T_i}$.

Для мажоритарного навантаженого резервування зі структурою типу « k із m » КГ визначається за формулою (3.9):

$$K_{ГМ} = \sum_{i=k}^m c_m^i (M[T_1]/M[T_0])^i (1 - M[T_1]/M[T_0])^{m-i},$$

где $c_m^i = \frac{m!}{i!(m-i)!}$ – кількість комбінацій.

Середній час знаходження ЗМ в станах $M[T_1], \dots, M[T_4]$ визначається з виразів (2.35), (2.37), (2.39) і (2.41) для Моделі 1; (2.35), (2.59), (2.39) і (2.41) для Моделі 2; (2.77), (2.79), (2.81) і (2.83) для Моделі 3 відповідно.

5. Проводимо оцінювання КГ резервованого обладнання програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000 множенням КГ, розрахованих в п. 4.

У табл. 4.3 наведені результати обчислень КГ для нерезерованих і резервованих ЗМ і обладнання SoftX3000 і UA5000 в цілому для Моделі 1 для середнього часу відновлення $t_{ЯВ} = t_{ПВ} = 1$ год і різної повноти контролю.

Таблиця 4.3

Результати розрахунку КГ для ЗМ обладнання СМРЗ

Найменування ЗМ	$a = 0,85$		$a = 1$	
	КГ нерезервованого ЗМ	КГ резервованого ЗМ	КГ нерезервованого ЗМ	КГ резервованого ЗМ
1. Плати касети OSTA:				
FCCU	0,991519	0,99992807	0,999851	0,999999978
IFMI/BFII	0,991551	0,999928613	0,999883	0,999999986
SMUI/SIUI	0,991551	0,999928613	0,999883	0,999999986
BSGI	0,991550	0,999928599	0,999882	0,999999986
MSGI	0,991550	0,999928599	0,999882	0,999999986
CDBI	0,991563	0,999928809	0,999895	0,999999989
ALUI	0,991531	0,999928282	0,999864	0,999999981
UPWR	0,991528	0,999997582	0,999860	0,9999999998
HSCI	0,991551	0,999928599	0,999883	0,999999986
2. Комутатор LAN	0,991436	-	0,999767	-
3. BAM	0,991550	-	0,999882	-
4. iGWB	0,991550	0,999928599	0,999882	0,999999986

Продовження табл. 4.3

Для MSoftX3000	0,736413	0,964392989	0,9984191	0,999415649
Полиці НАВА і НАВВ:				
PWX	0,991528	0,999928222	0,99986	0,99999998
xPMB	0,991551	0,999928599	0,999883	0,999999986
PVx	0,991551	0,999928599	0,999883	0,999999986
RSUx	0,991538	0,999928387	0,99987	0,999999983
AIUB	0,991551	0,999928599	0,999883	0,999999986
xSL	0,991519	-	0,999851	-
TSSB	0,991519	-	0,999851	-
Для UA5000	0,934257	0,982687883	0,996514	0,999701941

Запропонована методика дозволяє оцінити КГ як для окремих ЗМ і вузлів системи, так і для всієї СРЗ в цілому для випадків роботи системи без резерву або з різним резервуванням ЗМ, які рекомендуються виробником обладнання. Із табл. 4.4 випливає, що готовність, яка заявлена виробником, не завжди відповідає дійсності (що підтверджується компаніями, які експлуатують СРЗ) і дана методика дозволяє на теоретичному рівні уточнити необхідну кількість резервних ЗМ для забезпечення необхідного рівня готовності обладнання СРЗ.

4.4. Методики оцінювання повних експлуатаційних витрат в період гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування обладнання СРЗ

Дані методики призначені для розрахунку повних експлуатаційних витрат в періоди гарантійного та післягарантійного термінів обслуговування обладнання СРЗ. Методики ґрунтуються на математичних моделях і методах, розроблених в розділах 2 і 3 для випадку експоненційного закону розподілу напрацювань зйомних модулів до явної, прихованої і повторювальної відмов. Вихідні дані для розрахунків показані в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

№	Питомі вартості	Позначення	Середнє значення, у.о./год
1.	Вартість простою обладнання внаслідок проведення ПДКП	$C_{\text{ПДКП}}$	0,11

Продовження табл. 4.4

2.	Вартість робіт з монтажу/демонтажу ЗМ i -го типу	$C_{\text{ДМ}}$	5
3.	Вартість транспортування ЗМ i -го типу в сервісний центр для ремонту і назад	$C_{\text{ТР}}$	0,04
4.	Вартість простою обладнання внаслідок відсутності запасних ЗМ i -го типу	$C_{\text{ЗЗМ}}$	0,2
5.	Післягарантійне обслуговування	$C_{\text{ВІД}}$	8

4.4.1. Методика оцінювання повних експлуатаційних витрат в період гарантійного терміну обслуговування. Як було зазначено в розділі 3, в період ГТО усунення всіх несправностей і оновлення програмного забезпечення здійснюється за рахунок постачальника обладнання. При цьому такі витрати, як упаковка і транспортування ЗМ в сервісний центр, виконується за рахунок власника обладнання.

Методика оцінювання повних експлуатаційних витрат в період ГТО наступна:

1. Визначаємо кількість M типів, кількість L і вартість Q основних m ЗМ, які експлуатуються, кількість n резервних ЗМ, а також інтенсивності явних μ і повторювальних θ відмов з табл. 4.3 і вартості $C_{\text{ІДКП}}$, $C_{\text{ДМ}}$, $C_{\text{ТР}}$ і $C_{\text{ЗЗМ}}$ із табл. 4.6.

2. Визначаємо інтенсивність прихованих відмов λ ЗМ в залежності від повноти контролю a за формулою (2.44):

$$\lambda = \mu \frac{1-a}{a}.$$

3. Розраховуємо середній час знаходження ЗМ в стані Z_1 $M[T_1]$ за формулою (2.77)

$$M[T_1] = \frac{\lambda e^{-(\mu+\lambda+\theta)T} (1+T(\mu+\theta)) - e^{-\lambda T} (\mu+\lambda+\theta) + \mu+\theta}{(\mu+\theta)(\mu+\lambda+\theta)},$$

в стані Z_2 $M[T_2]$ за формулою (2.79)

$$M[T_2] = \frac{\lambda - \lambda e^{-(\mu+\lambda+\theta)T} (1 + T(\mu + \lambda + \theta)) - T(\mu + \lambda + \theta)^2 e^{-(\mu+\theta)T} (1 - e^{-\lambda T})}{(\mu + \lambda + \theta)^2} +$$

$$+ \frac{\lambda^3 (1 - e^{-(\mu+\lambda+\theta)T}) - e^{-(\mu+\lambda+\theta)T} (\mu + \theta)(\mu + \lambda + \theta)[(\mu + \theta)\lambda T + (\mu + \lambda + \theta)]}{\lambda(\mu + \theta)(\mu + \lambda + \theta)^2} -$$

$$- \frac{(\mu + \lambda + \theta)^2 e^{-(\mu+\theta)T} (1 - e^{-\lambda T})(\lambda - \mu - \theta)}{\lambda(\mu + \theta)(\mu + \lambda + \theta)^2},$$

в стані Z_3 $M[T_3]$ за формулою (2.81)

$$M[T_3] = \frac{t_{\text{ПВ}} \theta (1 - e^{-(\mu+\lambda+\theta)T})}{\mu + \lambda + \theta},$$

в стані Z_4 $M[T_4]$ за формулою (2.83)

$$M[T_4] = \frac{t_{\text{ЯВ}} (\mu + \lambda + \theta) - t_{\text{ЯВ}} \theta (1 - e^{-(\mu+\lambda+\theta)T})}{(\mu + \lambda + \theta)}$$

і в стані Z_5 $M[T_5] = 24$ год.

4. Визначаємо середній цикл регенерації за формулою (3.19)

$$M[T_0] = \sum_{i=1}^5 M[T_i].$$

5. Визначаємо очікувані операційні витрати власника обладнання СРЗ в період ГТО для сукупності нерезервованих ЗМ з виразу (3.34)

$$OPEX = M m T \left\{ C_{\text{ПДКП}} \frac{M[T_2]}{M[T_0]} + (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) \left(\frac{M[T_3]}{M[T_0]} + \frac{M[T_4]}{M[T_0]} \right) + C_{\text{ЗЗМ}} \frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right\}.$$

6. Проводимо оцінювання капітальних витрат власника обладнання СРЗ, приведених до початку гарантійного терміну експлуатації, за формулою (3.35)

$$CAPEX = \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right].$$

7. Розраховуємо повні експлуатаційні витрати для сукупності нерезервованих ЗМ для періоду гарантійного обслуговування за формулою (3.36):

$$TCO = M m T \left\{ C_{\text{ПДКП}} \frac{M[T_2]}{M[T_0]} + (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) \left(\frac{M[T_3]}{M[T_0]} + \frac{M[T_4]}{M[T_0]} \right) + C_{\text{ЗЗМ}} \frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right\} + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right]$$

8. Проводимо оцінювання ОРЕХ резервованого обладнання програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000, яке складається з m основних і n резервних ЗМ, за формулою (3.37) без урахування капітальних витрат:

$$OPEX = M T \sum_{i=1}^m \left[C_{\text{ПДКП}} \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^{n_i} + C_{\text{ЗЗМ}} \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^{n_i} \right] + (m+n)(C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) \left(\frac{M[T_3] + M[T_4]}{M[T_0]} \right)$$

9. Оцінюємо повні експлуатаційні витрати резервованого обладнання гнучкого комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000, яке складається з m основних і n резервних ЗМ, за формулою (3.37):

$$TCO = M T \sum_{i=1}^m \left[C_{\text{ПДКП}} \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^{n_i} + C_{\text{ЗЗМ}} \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^{n_i} \right] + (m+n)(C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) \left(\frac{M[T_3] + M[T_4]}{M[T_0]} \right) + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right]$$

10. Проводимо оцінювання ОРЕХ обладнання програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000, яке складається з m ЗМ, для мажоритарного навантаженого резервування зі структурою типу « k з m » за формулою (3.37) з урахуванням виразів (3.28) і (3.29) без урахування капітальних витрат:

$$\begin{aligned}
OPEX = M m T & \left\{ C_{\text{ПДКР}} \left[\sum_{j=2}^m c_m^j \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^j \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^{m-j} \right] + \right. \\
& + (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) \left[\sum_{j=2}^m c_m^j \left(\frac{M[T_3] + M[T_4]}{M[T_0]} \right)^j \left(\frac{M[T_3] + M[T_4]}{M[T_0]} \right)^{m-j} \right] + \\
& \left. + C_{\text{ЗСМ}} \left[\sum_{j=k}^m c_m^j \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^j \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^{m-j} \right] \right\},
\end{aligned}$$

де $c_m^j = \frac{m!}{j!(m-j)!}$ – кількість комбінацій.

11. Оцінюємо повні експлуатаційні витрати обладнання програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000, яке складається з m ЗМ, для мажоритарного навантаженого резервування зі структурою типу « k з m » за формулою (3.37) з урахуванням виразів (3.28) і (3.29):

$$\begin{aligned}
OPEX = M m T & \left\{ C_{\text{ПДКР}} \left[\sum_{j=2}^m c_m^j \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^j \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^{m-j} \right] + \right. \\
& + (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) \left[\sum_{j=2}^m c_m^j \left(\frac{M[T_3] + M[T_4]}{M[T_0]} \right)^j \left(\frac{M[T_3] + M[T_4]}{M[T_0]} \right)^{m-j} \right] + \\
& \left. + C_{\text{ЗСМ}} \left[\sum_{j=2}^m c_m^j \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^j \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^{m-j} \right] \right\} + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right],
\end{aligned}$$

де $c_m^j = \frac{m!}{j!(m-j)!}$ – кількість комбінацій.

У табл. 4.5 представлено значення повних експлуатаційних витрат в період ГТО для обладнання СРЗ для Моделі 3, розробленій в розділі 2, для середнього часу відновлення $t_{\text{ЯВ}} = t_{\text{ПВ}} = 1$ год і повноті контролю $a = 0,9$.

Аналіз результатів розрахунку повних експлуатаційних витрат в період ГТО показав, що операційні витрати в період ГТО мають величину порядку 0,01 у.о. і не впливають на повні експлуатаційні витрати. Значення капітальних витрат визначаються вартістю основних і резервних ЗМ при закупівлі обладнання.

Таблиця 4.5

Результати розрахунку повних експлуатаційних витрат в період ГТО

Найменування ЗМ	ОРЕХ/ТСО з резервуванням, у.о.
1. Плати касети OSTA:	
FCCU	0,0003/6400,0003
IFMI/BFII	0,0003/1800,0003
SMUI/SIUI	0,0003/1350,0003
BSGI	0,0003/1800,0005
MSGI	0,0003/1800,0005
CDBI	0,0001/1200,0001
ALUI	0,0001/74,0001
UPWR	0,116/222,116
HSCI	0,0002/900,0002
2. Комутатор LAN	0,0001/450,0001
3. BAM	0,0002/20200,0002
4. iGWB	0,0001/41000,0001
Для MSofTX3000	0,1183/77196,1187
Полиці НАВА и НАВВ:	
PWX	0,0003/160,0003
xPMB	0,0001/460,0001
PVx	0,0001/460,0001
RSUx	0,0001/460,0001
AIUB	0,0001/400,0001
xSL	0,0039/11800,0039
TSSB	0,0001/300,0001
Для UA5000	0,0047/14040,0047

4.4.2. Методика оцінювання повних експлуатаційних витрат в період післягарантійного терміну обслуговування. Як було показано в розділі 3, в період ПГТО основний вплив на експлуатаційні витрати будуть мати вартості резервних і запасних ЗМ, вартість оперативного ТО, а також вартість простою обладнання через відсутність запасних ЗМ.

Методика оцінювання повних експлуатаційних витрат в період ПГТО наступна:

1. Визначаємо кількість M типів, кількість L і вартість Q основних m експлуатованих ЗМ, які не мають гарантії в період ПГТО, кількість n резервних ЗМ,

а також інтенсивності явних μ і повторювальних θ відмов з табл. 4.3 і вартості, $C_{\text{ПДКП}}$, $C_{\text{ДМ}}$, $C_{\text{ТР}}$, $C_{\text{ЗЗМ}}$ і $C_{\text{ВІД}}$ із табл. 4.6.

2. Визначаємо інтенсивність прихованих відмов λ ЗМ в залежності від повноти контролю a за формулою (2.44):

$$\lambda = \mu \frac{1-a}{a}.$$

3. Для Моделі 1 і Моделі 2 розраховуємо середній час знаходження ЗМ в станах Z_1 $M[T_1]$ за формулою (2.35)

$$M[T_1] = \frac{1}{\mu + \lambda + \theta},$$

в станах Z_2 $M[T_2]$ для Моделі 1 за формулою (2.37)

$$M[T_2] = \frac{\lambda}{(\mu + \theta)(\mu + \lambda + \theta)},$$

для Моделі 2 за формулою (2.59)

$$M[T_2] = \frac{\lambda}{(\mu + \theta + \rho)(\mu + \lambda + \theta + \rho)},$$

для Моделі 1 і Моделі 2 в стані Z_3 $M[T_3]$ за формулою (2.39)

$$M[T_3] = \frac{t_{\text{ПВ}} \theta}{\mu + \lambda + \theta},$$

та для Моделі 1 і Моделі 2 в станах Z_4 $M[T_4]$ за формулою (2.41)

$$M[T_4] = t_{\text{ЯВ}} \left(\frac{\mu}{\mu + \theta} + \frac{\theta \lambda}{(\mu + \theta)(\mu + \lambda + \theta)} \right)$$

і в стані Z_5 $M[T_5] = 24$ год.

4. Визначаємо середній цикл регенерації для Моделі 1 і Моделі 2 за формулою (3.19)

$$M[T_0] = \sum_{i=1}^5 M[T_i].$$

5. Проводимо оцінювання повних експлуатаційних витрат нерезервованих ЗМ за формулою (3.38):

$$TCO = M m T \left\{ C_{\text{ПДКП}} \frac{M[T_2]}{M[T_0]} + (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}} + C_{\text{ВІД}}) \left(\frac{M[T_3]}{M[T_0]} + \frac{M[T_4]}{M[T_0]} \right) + C_{\text{ЗЗМ}} \frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right\} + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{l=1}^q Q_{l,k} F_{l,k} \right]$$

6. Розраховуємо повні експлуатаційні витрати резервованого обладнання програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000, яке складаються з m основних і n резервних ЗМ, за формулою (3.39):

$$TCO = M T \sum_{i=1}^m \left[C_{\text{ПДКП}} \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^{n_i} + C_{\text{ЗЗМ}} \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^{n_i} \right] + (m+n) (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}} + C_{\text{ВІД}}) \frac{M[T_3]}{M[T_0]} + \frac{M[T_4]}{M[T_0]} + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right]$$

7. Проводимо оцінювання повних експлуатаційних витрат обладнання програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000, яке складається з m ЗМ, для мажоритарного навантаженого резервування із структурою типу « k із m » за формулою (3.37) з урахуванням виразів (3.28) і (3.29):

$$TCO = M m T \left\{ C_{\text{ПДКП}} \left[\sum_{j=2}^m c_m^j \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^j \left(\frac{M[T_2]}{M[T_0]} \right)^{m-j} \right] + (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}} + C_{\text{ВІД}}) \left[\sum_{j=2}^m c_m^j \left(\frac{M[T_3] + M[T_4]}{M[T_0]} \right)^j \left(\frac{M[T_3] + M[T_4]}{M[T_0]} \right)^{m-j} \right] + C_{\text{ЗЗМ}} \left[\sum_{j=2}^m c_m^j \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^j \left(\frac{M[T_5]}{M[T_0]} \right)^{m-j} \right] \right\} + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} + \sum_{l=1}^q Q_{l,k} F_{l,k} \right],$$

де $c_m^j = \frac{m!}{j!(m-j)!}$ – кількість комбінацій.

У табл. 4.6 наведені значення повних експлуатаційних витрат в період ПГТО для обладнання СРЗ для Моделі 1 ТО, яку розроблено в розділі 2, за один календарний рік ($T = 8760$ год).

Таблиця 4.6

Результати розрахунку повних експлуатаційних витрат в період ПГТО

Найменування ЗМ	$a = 0,85$		$a = 0,9$	
	ОРЕХ/ТСО без резервування, у.о.	ОРЕХ/ТСО з резервуванням, у.о.	ОРЕХ/ТСО без резервування, у.о.	ОРЕХ/ТСО з резервуванням, у.о.
1. Плати касети OSTA:				
FCCU	124,9/4124,9	0,36/7200,36	113,07/4113,07	0,21/7200,2
IFMI/BFII	104,8/1229,8	0,33/2025,33	93,00/1218,00	0,17/2025,2
SMUI/SIUI	104,8/1229,8	0,33/1575,33	93,00/1218,00	0,17/1575,2
BSGI	157,9/1732,98	0,49/2025,49	140,29/1715,29	0,25/2025,25
MSGI	157,9/1732,98	0,49/2025,49	140,29/1715,29	0,25/2025,25
CDBI	48,75/648,75	0,16/1200,16	42,85/642,85	0,08/1200,08
ALUI	58,52/132,52	0,18/74,17	52,62/126,63	0,9/74,09
UPWR	119,26/304,26	0,1/259,1	107,47/292,47	0,1/259,1
HSCI	78,6/978,6	0,25/1125,25	69,75/969,75	0,12/1125,13
2. Комутатор LAN	88,4/20288,4	0,25/20200,25	82,52/20282,52	0,17/20200,17
3. BAM	52,66/41052,66	0,16/41000,16	46,76/41046,76	0,08/41000,08
4. iGWB	26,33/20526,33	0,08/41000,08	23,38/20523,38	0,04/41000,04
Для MSoftX 3000	1122,82/93981,98	3,18/119711,17	1005/93864,01	2,54/119709,79
Полиці НАВА і НАВВ:				
PWX	59,63/179,63	0,18/200,18	53,73/173,73	0,1/200,1
Xpmb	26,2/256,2	0,08/460,08	23,25/253,25	0,04/460,04
PVx	26,2/256,2	0,08/460,08	23,25/253,25	0,04/460,04
RSUx	28,29/258,29	0,09/460,09	25,34/255,34	0,05/460,05
AIUB	26,2/226,2	0,08/400,08	23,25/223,25	0,04/400,04
xSL	1779,24/13579,24	5,2/12205,2	1611,24/13411,24	2,92/12202,92
TSSB	31,21/331,21	0,09/300,09	28,27/328,27	0,05/300,05
Для UA5000	1976,97/15086,97	5,8/14485,80	1788,33/14898,33	3,24/14483,24

Аналіз результатів розрахунку повних експлуатаційних витрат в період ПГТО показав, що при дублюванні ЗМ на 70–85 % зменшилися оперативні витрати ОРЕХ, проте використання резервних і запасних ЗМ збільшує капітальні витрати CAPEX на 15–50 %. У разі коли на 57 працюючих ЗМ застосовуються два резервних капітальні витрати знизилася на 5 %. Із табл. 4.7 також видно, що зі збільшенням повноти контролю повні експлуатаційні витрати ТСО зменшуються.

4.5. Методика визначення прийняттого варіанту експлуатаційного резервування і кількості запасних ЗМ обладнання СРЗ

У якості приклада проведемо вибір прийняттого варіанту структурного резервування для плат обробки широкосмугового сигналізації BSGI програмного комутатора MSoftX3000 в період ПГТО із вирішення оберненої задачі за критерієм (3.41):

$$\min_{n,q} TCO(n,q)$$

при $K_{\Gamma}(n,q) \geq K_{\Gamma, \text{доп}}$

На рис. 4.7 представлена гістограма залежності повних експлуатаційних витрат і КГ від різних варіантів структурного резервування ($m-n-q$ – кількість активних, резервних і запасних ЗМ відповідно) для періоду ПГТО при фіксованому значенні повноти контролю $a = 0,85$.

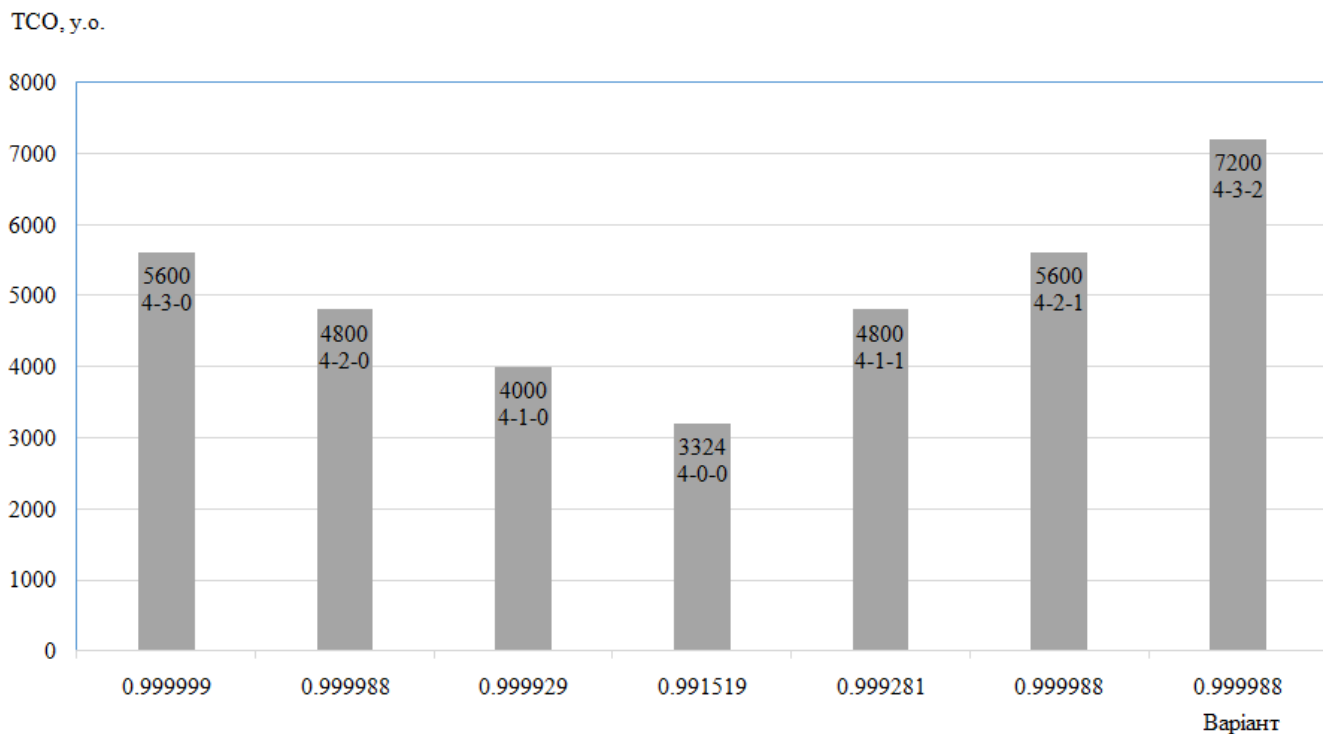


Рис. 4.7. Гістограма залежності TCO і КГ від різних варіантів структурного резервування

Як видно з рис. 4.7, задавшись допустимою величиною $K_{\Gamma, \text{доп}}$, можна визначити прийнятний варіант експлуатаційного резервування і кількості запасних частин при мінімальних експлуатаційних витратах TCO. Так, при допустимому КГ

$K_{Гдоп} = 0,9999$ прийнятним буде варіант 4–1–0 з мінімальним значенням повних експлуатаційних витрат 4000 у.о. і $K_{Г} = 0,999929$, тоді як при варіанті 4–2–1 і $K_{Г} = 0,999988$ значення ТСО буде більше за мінімальне й становитиме 5600 у.о.

4.6. Верифікація математичних моделей

З метою верифікації математичних моделей проведемо імітаційне моделювання процесу ТО обладнання СРЗ на прикладі Моделі 1 і покажемо відповідність статистичних оцінок середнього часу знаходження ЗМ в станах працездатності, непрацездатності та відновлення, а також коефіцієнта готовності значенням, які розраховуються за аналітичними формулами (2.36), (2.38), (2.40), (2.42) і (2.43). Моделювання проведемо з використанням методу Монте-Карло [9, 10]. Вихідними даними для імітаційного моделювання є наступні параметри:

- інтенсивність явних відмов $\mu = 5 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹;
- інтенсивність прихованих відмов $\lambda = 8,82 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹
- інтенсивність повторювальних відмов $\theta = 1 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹;
- час відновлення після явної відмови 1 год;
- час відновлення після повторювальної відмови 1 год;
- повнота контролю $a = 0,85$;
- кількість реалізацій випадкового процесу ТО обладнання СРЗ – 100 ітерацій;
- тривалість однієї ітерації – тривалість одного циклу – 1000000 год.

Тривалість і кількість ітерацій обрані з урахуванням нескінченного інтервалу спостереження за випадковим процесом ТО обладнання СРЗ. Алгоритм імітаційного моделювання випадкового процесу ТО обладнання СРЗ з використанням методу Монте-Карло представлено на рис. 4.8.

У табл. 4.7 представлено результати імітаційного моделювання і теоретичні значення середнього часу знаходження ЗМ в станах $M[T_1], \dots, M[T_4]$ працездатності, непрацездатності та відновлення, а також значення коефіцієнта готовності, розраховані за аналітичними формулами.

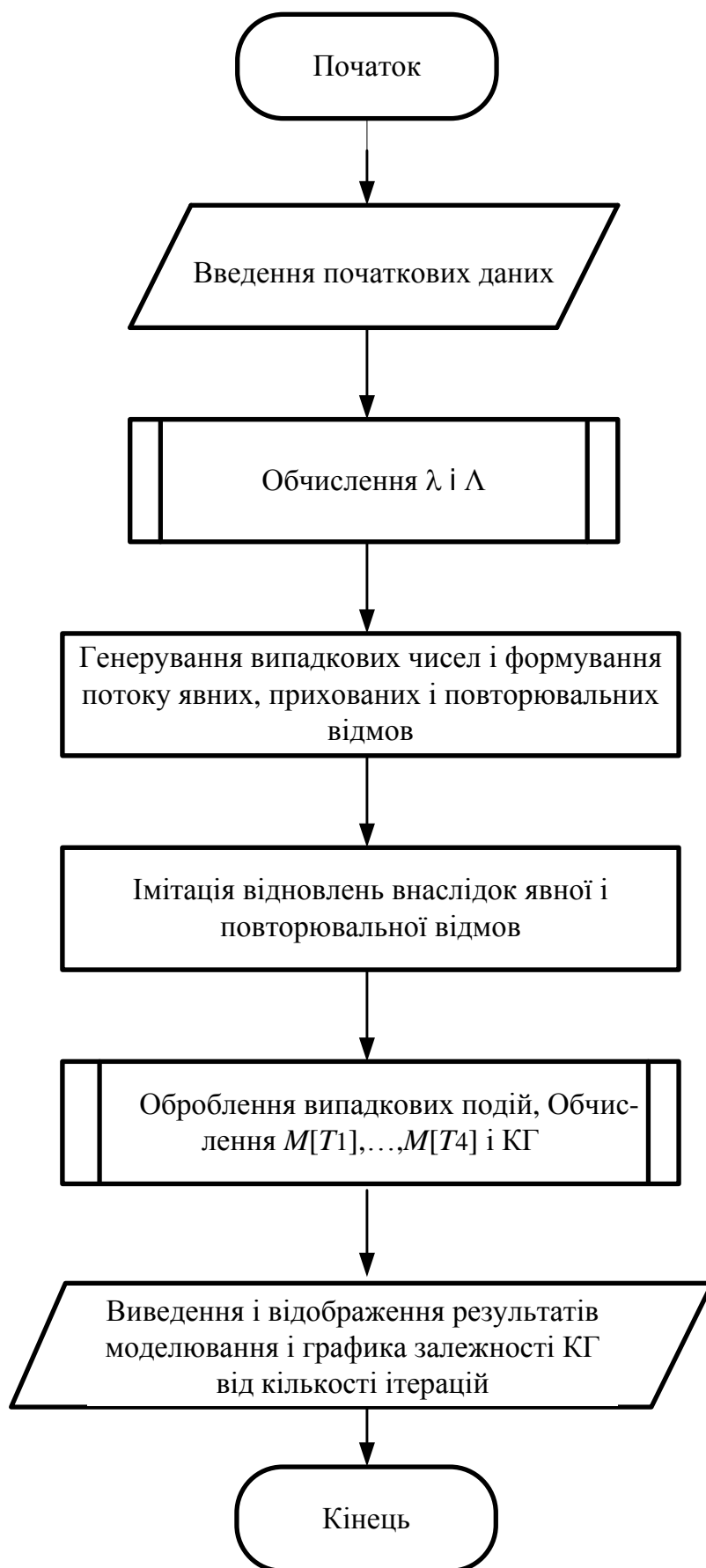


Рис. 4.8 Алгоритм імітаційного моделювання

Таблиця 4.7

Результати імітаційного моделювання

№	$M(T_1)$	$M(T_2)$	$M(T_3)$	$M(T_4)$	$K\Gamma$
1	9999,07	70,32415692	0,88	0,05	0,999907
2	9794,713867	204,2061333	1,04	0,04	0,979471387
3	9862,725911	136,1374222	1,076666667	0,06	0,986272591
4	9896,831933	102,1030666	1,015	0,05	0,989683193
5	9899,472495	99,48550456	0,992	0,05	0,98994725
6	9916,06208	82,90458714	0,988333333	0,045	0,991606208
7	9927,886068	71,06107469	1,008571429	0,044285714	0,992788607
8	9920,003739	78,91376105	1,03125	5,125	0,992000374
9	9916,054832	82,87183504	1,021111111	0,052222222	0,991605483
10	9894,170815	104,7501847	1,028	0,051	0,989417082
11	9885,789279	113,1270845	1,032727273	0,050909091	0,988578928
12	9890,353891	108,5561095	1,038333333	0,051666667	0,989035389
13	9881,705366	117,2054032	1,036923077	0,052307692	0,988170537
14	9888,652981	110,2541617	1,039285714	0,053571429	0,988865298
15	9884,414319	114,4943474	1,039333333	0,052	0,988441432
16	9887,249499	111,6642508	1,034375	0,051875	0,98872495
17	9893,819529	105,0957655	1,031176471	0,053529412	0,989381953
18	9899,668999	99,25711185	1,018888889	0,055	0,9899669
19	9904,895894	94,03305333	1,016315789	0,054736842	0,990489589
20	9909,600099	89,33140066	1,013	0,0555	0,99096001
21	9902,441161	96,49122012	1,011904762	0,055714286	0,990244116
22	9901,443783	97,49258047	1,007272727	0,056363636	0,990144378
23	9896,275457	102,6567165	1,01173913	0,056086957	0,989627546
24	9890,322285	108,6077147	1,014583333	0,055416667	0,989032229
25	9892,869749	106,0622513	1,0148	0,0532	0,989286975
26	9883,485289	115,4385568	1,021923077	0,054230769	0,988348529
27	9875,917877	123,005456	1,022592593	0,054074074	0,987591788
28	9880,311525	118,612404	1,021785714	0,054285714	0,988031152
29	9884,405265	114,5223211	1,01862069	0,053793103	0,988440527
30	9887,463989	111,455344	1,027333333	0,053333333	0,988746399
31	9879,037239	119,8882453	1,020967742	0,053548387	0,987903724
32	9882,770468	116,1626566	1,014375	0,0525	0,988277047
33	9886,295909	112,6425761	1,009393939	0,052121212	0,988629591
34	9874,70528	124,2347196	1,007352941	0,052647059	0,987470528
35	9878,259701	120,6851562	1,002571429	0,052571429	0,98782597
36	9867,065505	131,8756057	1,007222222	0,051666667	0,986706551
37	9861,823382	137,116077	1,009459459	0,051081081	0,986182338
38	9865,426188	133,5077592	1,015	0,051052632	0,986542619
39	9868,849876	130,0844833	1,015128205	0,050512821	0,986884988
40	9872,101129	126,8323713	1,0165	0,05	0,987210113
41	9875,195979	123,7388988	1,015609756	0,049512195	0,987519598
42	9878,144408	120,7927345	1,013571429	0,049285714	0,987814441
43	9877,366121	121,5708562	1,014418605	0,048604651	0,987736612
44	9880,122345	118,8078822	1,018181818	0,051590909	0,988012235
45	9882,765404	116,167707	1,015555556	0,051333333	0,98827654
46	9884,01427	114,9168169	1,017391304	0,051521739	0,988401427

Продовження табл. 4.7

47	9880,026164	118,904474	1,018723404	0,050638298	0,988002616
48	9879,125857	119,8091428	1,014791667	0,050208333	0,987912586
49	9880,746623	118,1905196	1,013265306	0,049591837	0,988074662
50	9875,505368	123,4300319	1,015	0,0496	0,987550537
51	9874,798094	124,1411212	101,0784314	0,05	0,987479809
52	9877,186977	121,753792	1,01	0,049230769	0,987718698
53	9876,174276	122,7657244	1,011132075	0,048867925	0,987617428
54	9878,449382	120,4922851	1,00962963	0,048703704	0,987844938
55	9880,639756	118,3015163	1,010363636	0,048363636	0,988063976
56	9879,21822	119,7248152	1,008392857	0,048571429	0,987921822
57	9880,675134	118,2678485	1,008245614	0,04877193	0,988067513
58	9882,009915	116,9335334	1,007586207	0,048965517	0,988200991
59	9883,822454	115,1190715	1,009491525	0,048983051	0,988382245
60	987620,1674	122,7401593	1,009333333	0,048833333	0,987620167
61	9878,212958	120,7280255	1,010327869	0,048688525	0,987821296
62	9873,389338	125,5514683	1,010967742	0,048225806	0,987338934
63	9875,382365	123,5585878	1,010952381	0,048095238	0,987538236
64	9876,390201	122,551674	1,00953125	0,04859375	0,98763902
65	9877,849134	121,0924047	1,01	0,048461538	0,987784913
66	9878,471155	119,2576713	1,011363636	0,048787879	0,987968218
67	9878,471155	121,9265338	1,010895522	0,048358209	0,987701421
68	9878,471155	120,472227	1,008529412	0,048088235	0,987847116
69	9877,665551	121,2790862	1,007246377	0,048115942	0,987766555
70	9879,0265	119,9182139	1,007	0,048285714	0,98790265
71	9879,376511	119,5692641	1,006056338	0,048169014	0,987937651
72	9881,038503	117,9085799	1,004861111	0,048055556	0,98810385
73	9879,672789	119,2733759	1,005616438	0,048219178	0,987967279
74	9880,017706	118,9275642	1,007162162	0,047567568	0,988001771
75	9881,60147	117,3418633	1,008933333	0,047733333	0,988160147
76	9883,14552	115,7978914	1,008947368	0,047631579	0,988314553
77	9882,466268	116,4778871	1,008701299	0,047142857	0,988246627
78	9881,401309	117,5426657	1,009102564	0,046923077	0,988140131
79	9882,175128	116,7691752	1,008987342	0,046708861	0,988217513
80	9880,838073	118,1084274	1,007	0,0465	0,988083807
81	9882,296738	116,6502987	1,006666667	0,046296296	0,988229674
82	9883,314389	115,6324404	1,006829268	0,046341463	0,988331439
83	9883,733661	115,2130859	1,00626506	0,046987952	0,988373366
84	9882,6738	116,2733427	1,006190476	0,046666667	0,98826738
85	9884,041402	114,905421	1,006470588	0,046705882	0,98840414
86	9885,376735	113,5693115	1,006976744	0,046976744	0,988537674
87	9882,874822	116,0709247	1,007011494	0,047241379	0,988287482
88	9884,193404	114,7519369	1,007386364	0,047272727	0,98841934
89	9882,085007	116,8604983	1,00752809	0,046966292	0,988208501
90	9879,399806	119,545527	1,007555556	0,047111111	0,987939981
91	9880,711457	118,2318399	1,009450549	0,047252747	0,988071146
92	9881,997637	116,9467112	1,008478261	0,047173913	0,988199764
93	9883,253576	115,6892197	1,009784946	0,047419355	0,988325358
94	9884,486091	114,4584833	1,008191489	0,047234043	0,988448609
95	9885,692027	113,2536572	1,007368421	0,046947368	0,988569203

Продовження табл. 4.7

96	9886,871485	112,0739316	1,0075	0,047083333	0,988687149
97	9887,303341	111,6408855	1,008969072	0,046804124	0,988730334
98	9888,443409	110,5016928	1,008163265	0,046734694	0,988844341
99	9889,560243	109,3855141	1,007171717	0,047070707	0,988956024
100	9890,654741	108,2916589	1,0058	0,0478	0,989065474
теор.	9444,444444	110,3650794	0,944444444	0,055555556	0,991562553

Графіки залежності КГ від кількості ітерацій представлені на рис. 4.9. Із рисунка видно, що результати моделювання показують високу збіжність оцінки КГ до його обчисленого значення зі збільшенням кількості реалізацій випадкового процесу ТО обладнання СРЗ.



Рис. 4.9. Залежність КГ від кількості реалізацій випадкового процесу ТО обладнання СРЗ

4.7. Висновки.

1. Розглянуто особливості побудови обладнання сучасних систем радіозв'язку на прикладі обладнання комунікаційної платформи U-SYS компанії Huawei Technologies Co., Ltd. Показано, що для збільшення надійності і готовності обладнання СРЗ широко застосовуються методи апаратного і програмного резервування ЗМ, в тому числі і з географічним рознесенням, що призводить до великих фінансових витрат власників обладнання СРЗ. Доведено, що для зниження експлуатаційних і капітальних витрат при допустимому коефіцієнті готовності

необхідно оптимізувати кількість резервних і запасних елементів або модулів обладнання СРЗ.

2. Розроблено методику оцінювання готовності обладнання СРЗ. Розраховано коефіцієнти готовності резервованого і нерезервованого обладнання СРЗ на прикладі програмного комутатора MSoftX3000 і шлюзу мультисервисного доступу UA5000 для математичних моделей, які розроблено в розділах 2 і 3. Запропонована методика дозволяє оцінити КГ як для окремих ЗМ і вузлів системи, так і для всієї СРЗ в цілому для випадків роботи системи без резерву або з різним резервуванням ЗМ. Показано, що рівень готовності, який заявляється виробником, не завжди відповідає дійсності і дана методика дозволяє на теоретичному рівні уточнити необхідну кількість резервних ЗМ для забезпечення необхідного рівня готовності обладнання СРЗ.

3. Розроблено методику оцінювання повних експлуатаційних витрат в період гарантійного терміну обслуговування обладнання СРЗ. Аналіз результатів розрахунку повних експлуатаційних витрат в період ГТО показав, що операційні витрати в період ГТО мають величину порядку 0,01 у.о. і не впливають на повні експлуатаційні витрати. Значення капітальних витрат визначаються вартістю основних і резервних ЗМ при закупівлі обладнання.

4. Розроблено методику оцінювання повних експлуатаційних витрат в період післягарантійного терміну обслуговування обладнання СРЗ. Аналіз результатів розрахунку повних експлуатаційних витрат в період ПГТО показав, що при дублюванні ЗМ оперативні витрати OPEX зменшуються на 70–85%, однак використання резервних і запасних ЗМ збільшує капітальні витрати CAPEX на 15–50%. Також показано, що зі збільшенням повноти контролю повні експлуатаційні витрати зменшуються.

5. Запропоновано методику вибору прийнятного варіанту структури експлуатаційного резервування, кількості резервних і запасних ЗМ обладнання СРЗ, яка, на відміну від відомих, дозволяє обирати прийнятний вид резервування при допустимому значенні коефіцієнта готовності та мінімумі повних експлуатаційних

витрат. Дана методика дозволяє проводити оптимізацію процесу ТО в періоди як гарантійного, так і післягарантійного термінів обслуговування.

6. Розроблено імітаційний алгоритм статистичного моделювання процесу технічної експлуатації обладнання СРЗ, який дозволяє, на відміну від відомих алгоритмів, зімітувати значення середнього часу знаходження ЗМ в станах працездатності, непрацездатності та відновлення, а також коефіцієнта готовності при різних інтенсивностях відмов і повноті контролю. Показано, що результати імітаційного моделювання та аналітичні розрахунки показників мають досить високу збіжність. Так, при кількості ітерацій рівній 100, відносне відхилення оцінки КГ від розрахункового значення становить менше 5%, що підтверджує адекватність розроблених в дисертації математичних моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Росляков А. В., Крылов П. С. Принципы построения, применения и проектирования оборудования коммуникационной платформы U-SYS/ Под ред. А. В. Рослякова. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2013. – 108 с.
2. MSOFTX3000 V200R008 Mobile Softswitch Center Product Description, issue V1.0 (2009-05-15). [Електронний ресурс]. URL: <https://fccid.io/ANATEL/02683-09-03257/Manual/3FB147AC-F815-47D9-9CC0-05EA9FCF0A78> (дата звернення: 10.03.17).
3. UA5000 Electronic Documentation. Huawei Technologies Co., Ltd. [Електронний ресурс] – URL: <http://carrier.huawei.com/en/products/fixed-network> (дата звернення: 10.03.17).
4. OSTA 2.0 XCBF Switch Board V200R006C02 Configuration Guide-Network Management / Huawei Technologies Co., Ltd. – 2012. – 120 с.
5. Сети NGN становятся реальностью / Сети и Бизнес – 2008 – № 6. – С. 23–32.
6. Нетес В. А. Надежность сетей связи в период перехода к NGN / Вестник связи. – 2007. – №9. – С. 2–11.
7. [Електронний ресурс]. URL: https://www.alibaba.com/product-detail/Huawei-softx3000_60652654354.html (дата звернення: 15.04.17).

8. [Электронный ресурс] URL: https://ru.aliexpress.com/store/product/Huawei-MSoftX3000-series-board-WSMU-WCCU-WCSU-WSGU-BSG/110842_629566653.html

(дата звернення: 15.04.17).

9. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. – Киев: Изд. группа BHV, 2004. – 847 с.

10. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. – М.: Изд. Дом «Дело». – 2. – 2015. – 496 с.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, яка полягає в розробленні математичних моделей процесу ТО обладнання СРЗ для оцінювання готовності обладнання СРЗ та методів, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації обладнання СРЗ за рахунок зниження експлуатаційних витрат при підтримці належного рівня готовності систем радіозв'язку.

У процесі виконання дисертаційної роботи отримано такі основні результати:

1. Проведено аналіз відомих математичних моделей процесу ТО обладнання СРЗ і техніко-економічних показників оцінки ефективності експлуатації СРЗ. Обґрунтовано необхідність у розробленні математичних моделей процесу ТО обладнання СРЗ і вдосконаленні методу оцінювання повних експлуатаційних витрат, які мають враховувати особливості процесу безперервного контролю технічного стану обладнання сучасних СРЗ, повноту контролю працездатності, а також вплив явних, прихованих і повторювальних відмов.

2. Уперше розроблено математичну модель процесу ТО нерезервованого обладнання СРЗ (Модель 1), охопленого безперервним контролем працездатності, яка одночасно враховує вплив явних, прихованих і повторювальних відмов, а також повноти контролю на рівень готовності при довільному законі напрацювань обладнання до відмов. Модель дозволяє отримати оцінки готовності обладнання СРЗ на нескінченному інтервалі часу, зокрема, в період післягарантійного обслуговування. Проведено чисельний аналіз і проілюстровано, що при зменшенні інтенсивності повторювальних відмов на 10 % готовність обладнання СРЗ збільшується на 12 %.

3. Запропоновано математичну модель ТО з урахуванням старіння елементів обладнання СРЗ на нескінченному інтервалі часу. Проведено оцінювання впливу на готовність обладнання деградаційних процесів, властивих електронним компонентам, які входять до його складу. Чисельний аналіз за 100 % повноти контролю показав, що відмінність у значеннях коефіцієнта готовності при DN -розподілі та при експоненційному законі розподілу напрацювання ЗМ до

повторювальної відмови становить 0,2–0,5 %, оскільки обладнання має велике напрацювання до відмови.

4. Уперше запропоновано математичну модель процесу ТО нерезервованого обладнання СРЗ (Модель 2), яка дає змогу оцінити готовність обладнання з урахуванням повторювальних відмов у разі проведення повного додаткового контролю, який виконується після прояву відмов. Показано, що за наявності повторювальних відмов ПДКП дозволяє підвищити величину КГ.

5. Уперше розроблено математичну модель процесу ТО обладнання СРЗ (Модель 3) на кінцевому інтервалі експлуатації для довільного закону розподілу напрацювань до явної, прихованої і повторювальної відмов з урахуванням повноти контролю. Дана модель дозволяє проводити оцінювання готовності обладнання СРЗ на обмеженому інтервалі часу, зокрема, в період гарантійного обслуговування.

6. Уперше розроблено математичну модель ТО резервованого обладнання СРЗ, яка дозволяє оцінювати коефіцієнт готовності обладнання і проводити вибір оптимальної структури резервування з урахуванням характеристик явних, прихованих і повторювальних відмов, а також повноти контролю.

7. Удосконалено методи оцінювання повних експлуатаційних витрат у періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування, які враховують види експлуатаційного резервування і дозволяють визначити прийнятний варіант експлуатаційного резервування і кількості запасних модулів при максимумі коефіцієнта готовності та обмеженні на експлуатаційні витрати або в разі обмеження на коефіцієнт готовності та мінімуму експлуатаційних витрат.

8. Розроблено методику оцінювання готовності обладнання СРЗ, яка дозволяє оцінити КГ як для окремих модулів, так і для всієї СРЗ в цілому для випадків роботи системи без резерву або з різними видами резервування.

9. Розроблено методики оцінювання повних експлуатаційних витрат у періоди гарантійного та післягарантійного обслуговування обладнання на прикладі обладнання СРЗ платформи U-SYS. Аналіз результатів розрахунку повних експлуатаційних витрат в період ПГСО показав, що попри те, що використання резервних і запасних ЗМ збільшує капітальні витрати CAPEX на 15–50 % при

дублюванні ЗМ, оперативні витрати ОРЕХ зменшуються на 70–85 %, що в сукупності підвищує ефективність експлуатації СРЗ.

10. Запропоновано методику вибору прийнятного варіанта структури експлуатаційного резервування, кількості резервних і запасних ЗМ обладнання СРЗ, яка дозволяє проводити вибір при обмеженні на коефіцієнт готовності обладнання СРЗ і мінімальних експлуатаційних витратах. Розроблено комплекс програмного забезпечення, яке дозволяє виконувати розрахунки за запропонованими методиками.

11. Розроблено імітаційний алгоритм і програму статистичного моделювання процесу технічної експлуатації СРЗ. Показано, що результати імітаційного моделювання та розрахунки за розробленими аналітичними моделями мають досить високу збіжність. Так, при кількості ітерацій, що дорівнює 100, відносне відхилення оцінки КГ від розрахункового значення становить менше 5 %, що підтверджує адекватність розроблених у дисертації математичних моделей.

Упровадження результатів в провідних організаціях і їх експериментальне дослідження підтвердило достовірність та працездатність розроблених методів, математичних моделей та методик, теоретичних положень і висновків дисертаційної роботи. Отримані в рамках дисертації результати можуть бути використані під час розроблення, експлуатації та технічного обслуговування сучасних систем радіозв'язку.

Додаток А

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ulansky V. V., Terentyeva I. E. Availability modeling of a digital electronic system with intermittent failures and continuous testing. *Engineering Letters*. – 2017. – V. 25, № 2. – P. 104 – 111. (Scopus)
2. Терентьева И. Е. Метод оценки эффективности эксплуатации телекоммуникационных систем с учетом показателей надежности. *Телекоммуникаційні та інформаційні технології*. – 2016. - № 1. – С. 113 – 119.
3. Терентьева И. Е. Структуризация та оцінювання готовності резервованого обладнання системи наземного радіодоступу UTRAN. *Радиоэлектроника и информатика*. – 2015. – № 3. – С. 3 – 8.
4. Одарченко Р. С., Терентьева И. Е., Гнап Р. В., Михайленко К. О. Дослідження перспективних технологічних рішень для стільникових мереж сімейства стандартів 5G. *Стандартизація, сертифікація, якість*. – К., 2016. – № 6(103). – С. 14-19.
5. Габрусенко Е. И., Тараненко А. Г., Терентьева И. Е. Методы формирования и оценки параметров кластера в сотовых системах мобильной связи. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Київської державної академії водного транспорту ім. гетьмана П. Конашевича-Сагайдачного*. – К.: КДАВТ, 2014. – № 3(21). – С. 31–36.
6. Мачалин И. А., Андрухович П. А., Пузыренко А. Ю., Терентьева И. Е. Оценка уровня утечки информации за счет побочного электромагнитного излучения. *Захист інформації*. – 2013. – № 2. – С. 159–164.
7. Мачалин И. О., Луцеїн В. І., Терентьева И. Е. Показники ефективності експлуатації апаратури сучасних мереж передачі даних. *Захист інформації*. – 2005. – № 4. – С. 68–72.
8. Мачалин И. О., Луцеїн В. І., Терентьева И. Е. Вибір визначальних параметрів відповідності обладнання сучасних систем передачі даних. *Захист інформації*. – 2005. – № 5. – С. 46–51.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Ulansky V. V., Terentyeva I. E. Availability assesement of a telecommunications system with permanent and intermittent faults. 2017 IEEE First Ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON), 29 May–2 June 2017: conference proceedings. – K., 2017. – pp. 908–911. (Scopus)
2. Габрусенко Е. И., Тараненко А. Г., Терентьева И. Е. Метод пространственного мультиплексирования данных в системах сотовой связи. Современные средства связи. XXI Міжнар. наук.-техн. конф., 20–21 жовтня 2016р.: тези доп. – Мінськ, Республіка Білорусь. – С. 47–48.
3. Терентьева И. Е. Оцінка доступності інформаційно-комунікаційних систем з урахуванням різних видів відмов. Інформаційна безпека та комп'ютерні технології: міжн. наук.-практ. конф., 24–25 березня 2016 р.: тези доп. – Кіровоград, 2016. – С. 135.
4. Терентьева И. Е. Показники оцінки ефективності структурної збитковості обладнання UMTS. Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: наук.-техн. конф., 17–19 листопада 2014 р.: тези доп. – К., 2014. – С. 58.
5. Terentyeva I. E. Optimization of the redundancy structure of broadband wireless access equipment. Проблеми навігації і управління рухом: Всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 18–20 листопада 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 118.
6. Уланский В. В., Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Методы обеспечения заданного уровня доступности сетей широкополосного радиодоступа UMTS/CDMA. Комп'ютерні системи та мережні технології: VII міжнар. наук.-техн. конф., 17–19 квітня 2014 р.: тези доп. – К., 2014. – С. 145.
7. Терентьева И. Е., Пузыренко А. Ю. Повышение защищенности информационно-коммуникационных систем на основе структурной избыточности. ITSEC: Безпека інформаційних технологій: III між нар. наук. конф., 21–24 травня 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 56.
8. Уланский В. В., Мачалин И. А., Терентьева И. Е., Варченко О. И. Оценка готовности оборудования универсальной наземной сети радиодоступа. Новітні

технології в телекомунікаціях (ДУІКТ-Карпати-2013): VI міжнар. наук.-техн. симпоз., 21–25 січня 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 144–145.

9. Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Комбинированные методы резервирования оборудования телекоммуникационных систем. Проблемы розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: наук.-техн. конф., 28–30 листопада 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 44.

10. Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Повышение качества услуг интегральных телекоммуникационных систем на основе повышения уровня надежности. Проблемы навігації і управління рухом: наук.-практ. конф., 28–29 листопада 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 102.

11. Мачалин И. А., Терентьева И. Е. Алгоритм диагностирования телекоммуникационных систем. Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO-2012-Livadia): VIII міжнар. наук. конф., 4–8 жовтня 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 144.

Додаток Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи