

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

На правах рукопису

ТЕРЕНТЬЄВА Ірина Євгенівна

УДК 654.16:621.396.6 (043.5)

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

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор,
Уланський Володимир Васильович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Уваров Борис Михайлович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сикорського», професор кафедри радіоконстру-
ювання та виробництва радіоелектронної
апаратури

доктор технічних наук, професор,
заслужений винахідник України,
Богом'я Володимир Іванович,
Державний університет інфраструктури
та технологій, професор кафедри технічних сис-
тем та процесів управління в судноводінні

Захист відбудеться « 22 » березня 2018 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.08 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03680, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, ауд. 1.001.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корп. 8.

Автореферат розіслано « 19 » лютого 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.062.08
д.т.н., професор



Шутко В. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 повинно бути не менше, ніж 0,9999, а в деяких відповідальних випадках – наблизитися до 0,99999. Тому тема дисертації спрямована на забезпечення необхідного рівня готовності сучасних СРЗ, є актуальною.

Зрозуміло, що без застосування методів експлуатаційного резервування обладнання дотриматися таких норм не є можливим. Тому в сучасних системах широко використовуються різноманітні види 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. Унаслідок цього екстенсивні методи підвищення ступеня експлуатаційного резервування обладнання СРЗ пов'язані з різким збільшенням експлуатаційних витрат. За таких умов оптимізація схем і процедур резервування обладнання СРЗ, а також оптимізація кількості запасних частин при заданому рівні готовності є основними заходами з 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., Соловійов О. Д., Стрельніков В. П., Уваров Б. М., Сох D., Smith W., Nakagava T., Pham H., Barlow R., Proshan F., Beichelt 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 якого залежить правильне прийняття рішення про технічний стан. Тому необхідно розробити математичні моделі, які дозволяють 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 відрізнитися. 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 у 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 таких 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); «Простір-Ф», № ДР РК0108U000066Т; шифр «Базис» № ДР 0115U000021т.

Мета і завдання 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 виконати такі наукові завдання:

- провести аналіз обладнання СРЗ з погляду надійності та контролепридатності; класифікувати методи і види резервування обладнання СРЗ; розглянути відомі математичні моделі процесу ТО і техніко-економічні показники 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 дасть змогу 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 ґрунтуються на апараті теорії надійності, теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії управління запасами, теорії відновлення, теорії регенеруючих випадкових процесів, теорії математичного моделювання, 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. 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.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень. Підтверджується коректним використанням сучасного математичного апарату, застосуванням наукових положень теорії надійності й експлуатації технічних систем, узгодженістю отриманих теоретичних результатів з експериментальними й 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 у такому:

- розроблено методику оцінювання готовності обладнання СРЗ, розраховано коефіцієнт готовності на прикладі обладнання компанії Huawei Technologies (КНР) і показано, що в разі зменшення інтенсивності повторювальних відмов на 10 % готовність обладнання СРЗ збільшується на 12 %;

- розроблено методики оцінювання експлуатаційних витрат у періоди гарантійного та післягарантійного термінів обслуговування обладнання СРЗ і показано, що попри 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 варіанта 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 та оцінювати основні параметри процесу ТО;

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

Матеріали дисертаційної роботи впроваджено у Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут «Квант», в Державному науково-дослідному інституті спеціального зв'язку та захисту інформації, а також у навчальному процесі Національного авіаційного університету.

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: у роботах [1, 9] – математична модель процесу ТО нерезервованих блоків для довільних законів розподілу напрацювання електронного цифро-

вого обладнання до відмови та з урахуванням повторювальних відмов і повноти контролю; у роботі [4] – дослідження особливостей обладнання стільникових мереж сімейства стандартів 5G; у 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 у системах стільникового зв'язку; в роботах [14–17] – математичні моделі оцінювання готовності обладнання мереж радіодоступу; в роботі [18] – розроблення методу підвищення надійності телекомунікаційних систем; у роботі [19] – розроблення методу діагностування обладнання телекомунікаційних систем.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати, отримані автором, доповідалися та обговорювалися на конференціях і симпозиумах: 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 симпозиум «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, May 29–June 2, 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 та 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, викладено зв'язок з науковими темами, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, показано наукову новизну і практичне значення.

У першому розділі проведено аналіз особливостей побудови обладнання СРЗ. Показано, що обладнання СРЗ охоплено безперервним контролем технічного стану з різною повнотою контролю.

Обґрунтовано, що для 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.

Проаналізовано відомі математичні моделі процесу технічної експлуатації цифрових електронних систем і СРЗ. Аналіз показав, що відомі моделі не враховують вплив повторювальних відмов на надійність і готовність обладнання, а також застосовуються тільки в разі періодичного контролю його працездатності за 100 % повноти контролю. Також у відомих моделях не враховується одночасно наявність явних, прихованих і повторювальних відмов, безперервний режим експлуатації і контролю працездатності обладнання сучасних СРЗ. Обґрунтовано, що при розробленні математичних моделей процесу технічного обслуговування обладнання СРЗ необхідно враховувати безперервний режим контролю працездатності, повноту контролю, а також види відмов, які властиві обладнанню СРЗ.

Проведено аналіз методів резервування обладнання СРЗ. Наведено класифікацію різних видів резервування. Показано, що введення додаткового резервування дозволяє підвищити готовність системи, але при цьому потрібні додаткові витрати, оскільки обладнання і програмне забезпечення мають високу вартість. Розглянуто відомі технічні показники ефективності процесу експлуатації технічних систем. Показано, що як показник готовності обладнання СРЗ доцільно використовувати коефіцієнт готовності (КГ). Наведено вимоги до коефіцієнта готовності обладнання СРЗ.

Оскільки застосування резервування призводить до додаткових фінансових витрат, проведено аналіз відомих техніко-економічних показників оцінювання ефективності СРЗ. Показано, що відомі показники не враховують параметри надійності систем і компонентів, а також витрати на додаткове резервування зйомних модулів і на підтримку необхідного обмінного фонду запасних компонентів, які забезпечують заданий рівень готовності обладнання. Це не дозволяє адекватно оцінити необхідні капітальні внески на заданому етапі життєвого циклу. Для оцінювання експлуатаційних витрат обраний показник сукупної вартості володіння системою ТСО (*Total cost of ownership*), який, як показав аналіз, є найбільш поширеним у світовій практиці показником для оцінювання ефективності СРЗ. Обґрунтовано, що зазначений показник треба вдосконалити так, аби він дозволяв врахувати перелічені вище складові.

На підставі проведеного аналізу сформульовано основні завдання досліджень дисертаційної роботи: розроблення математичних моделей і методів забезпечення готовності обладнання СРЗ.

У другому розділі розроблено математичні моделі технічного обслуговування нерезервованого обладнання СРЗ.

Модель 1. Математична модель технічного обслуговування ЗМ обладнання СРЗ при довільному законі розподілу напрацювання зйомного модуля до відмови на нескінченному інтервалі часу. Процес ТО ЗМ розглядається у вигляді послідовності зміни різних станів ЗМ, які описуються випадковим регенеруючим процесом $Z(t)$ з кінцевим простором станів. У процесі ТО залежно від технічного стану і при різних видах відмов ЗМ може стрибкоподібно переходити в один із можливих станів.

Регенеруючий процес описано 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. Нехай T_i – випадковий час знаходження ЗМ в стані Z_i ($i = 1, \dots, 4$) за випадковий цикл регенерації T_0 ; $M[T_i]$ – середнє значення часу за середній цикл регенерації $M[T_0]$. Оскільки справедливим є співвідношення $T_0 = \sum_{i=1}^4 T_i$, тоді, використовуючи теорему додавання математичних сподівань, отримуємо

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

Коефіцієнт готовності ЗМ визначається за формулою

$$K_r = M[T_1] / M[T_0]. \quad (2)$$

Таким чином, для розрахунку коефіцієнта готовності 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 введемо такі позначення: $\Phi(t)$ – функція розподілу (ФР) напрацювання до явної відмови в частині ЗМ, яка охоплена контролем; $\phi(t)$ – 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; $\Psi(t)$ – ФР 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.

Отримано середній час знаходження модуля в працездатному стані для довільного закону розподілу напрацювання до відмови:

$$M[T_1] = \int_0^{\infty} \left\{ \int_0^v [1 - \Psi(u)] u d\Phi(u) + \int_0^v [1 - \Phi(x)] x d\Psi(x) + v [1 - \Psi(v)] [1 - \Phi(v)] \right\} dF(v). \quad (3)$$

Аналогічно отримано середній час перебування ЗМ в інших станах:

$$M[T_2] = \int_0^{\infty} \left\{ \int_v^{\infty} (u - v) [1 - \Psi(u)] d\Phi(u) + \int_v^{\infty} (x - v) [1 - \Phi(x)] d\Psi(x) \right\} dF(v); \quad (4)$$

$$M[T_3] = t_{\text{ПВ}} \int_0^{\infty} [1 - F(x)] [1 - \Phi(x)] \psi(x) dx; \quad (5)$$

$$M[T_4] = t_{\text{ЯВ}} \int_0^{\infty} [1 - \Psi(u)] \phi(u) du + t_{\text{ЯВ}} \int_0^{\infty} F(x) [1 - \Phi(x)] \psi(x) dx, \quad (6)$$

де $t_{\text{ПВ}}$ – середній час проведення операцій з відновлення ЗМ через повторювальну відмову, $t_{\text{ЯВ}}$ – середній час проведення операцій з відновлення ЗМ через явну відмову.

Далі в роботі отримані 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 явних, прихованих і повторювальних відмов. Введемо такі позначення: μ – інтенсивність явних відмов; λ – інтенсивність прихованих відмов; θ – інтенсивність повторювальних відмов. Підставляючи щільності розподілу ймовірностей випадкових величин у формулу (3), отримаємо вираз для визначення середнього часу знаходження ЗМ в працездатному стані

$$M[T_1] = 1 / (\mu + \lambda + \theta).$$

Аналогічно отримуємо середні часи перебування ЗМ в інших станах:

$$M[T_2] = \lambda / (\mu + \theta)(\mu + \lambda + \theta);$$

$$M[T_3] = t_{\text{ГВ}} \theta / (\mu + \lambda + \theta);$$

$$M[T_4] = t_{\text{ЯВ}} \left[\mu / (\mu + \theta) + \theta \lambda / (\mu + \theta)(\mu + \lambda + \theta) \right].$$

Підставляючи значення середнього часу знаходження зйомного модуля в станах Z_1, \dots, Z_4 у формулу (2), знайдемо коефіцієнт готовності ЗМ

$$K_{\Gamma} = (\mu + \theta) / \left\{ (\mu + \lambda + \theta)(1 + t_{\text{ЯВ}} \mu) + \theta [t_{\text{ГВ}} (\mu + \theta) + t_{\text{ЯВ}} \lambda] \right\}.$$

Статистичний аналіз процесу технічної експлуатації обладнання СРЗ показує, що зі збільшенням часу напрацювання зйомних модулів збільшується інтенсивність відмов, однак найчастіше виявляють себе повторювальні відмови внаслідок старіння елементів цих модулів. Тому для врахування деградації параметрів ЗМ застосовано дифузійний DN -розподіл напрацювання модуля до повторювальної відмови і проведено оцінку впливу параметрів DN -розподілу на готовність модуля обладнання СРЗ. Метод отримання математичних виразів для визначення коефіцієнта готовності аналогічний попередньому.

Модель 2. Математична модель технічного обслуговування нерезервованого зйомного модуля обладнання СРЗ з урахуванням ПДКП. Для даної моделі у випадку експоненційного закону розподілу наробіток ЗМ до явних, прихованих і повторювальних відмов коефіцієнт готовності визначатиметься за формулою

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

де ρ – інтенсивність виявлення прихованих відмов за допомогою ПДКП.

Модель 3. Математична модель технічного обслуговування нерезервованого зйомного модуля обладнання СРЗ на кінцевому інтервалі часу. Отримано середній час знаходження модуля в різних станах для довільного закону розподілу напрацювання до відмов:

$$\begin{aligned} M[T_1] &= \int_0^T \int_0^v [1 - \Psi(u)] \mu d\Phi(u) + \int_0^v [1 - \Phi(x)] x d\Psi(x) + v [1 - \Psi(v)] [1 - \Phi(v)] dF(v) + \\ &\quad + T \int_T^{\infty} [1 - \Phi(v)] [1 - \Psi(v)] dF(v); \\ M[T_2] &= \int_0^T \int_v^T (u - v) [1 - \Psi(u)] d\Phi(u) + \int_v^T (x - v) [1 - \Phi(x)] d\Psi(x) dF(v) + \\ &\quad + [1 - \Phi(T)] [1 - \Psi(T)] \int_T^{\infty} (T - y) dF(y); \end{aligned}$$

$$M[T_3] = t_{\text{ПВ}} \int_0^T [1 - F(x)][1 - \Phi(x)]\psi(x) dx;$$

$$M[T_4] = t_{\text{ЯВ}} \int_0^T [1 - \Psi(u)]\phi(u) du + t_{\text{ЯВ}} \int_0^T F(u)[1 - \Phi(u)]\psi(u) du +$$

$$+ t_{\text{ЯВ}} [1 - \Psi(T)] \int_T^{\infty} \phi(u) du.$$

Коефіцієнт готовності ЗМ на кінцевому інтервалі часу при експоненційному законі розподілу напрацювання до відмови має такий вигляд

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

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

Третій розділ присвячено розробленню математичної моделі технічного обслуговування і показників для оцінювання експлуатаційних витрат резервованого обладнання СРЗ. Визначено коефіцієнти готовності для послідовної, паралельної і змішаної з погляду надійності структур резервування, а також для структури типу « k із m ». Проведено дослідження отриманих показників.

На основі аналізу відомих показників оцінки ефективності використання СРЗ, проведеного в розділі 1, для визначення повних експлуатаційних витрат в роботі використовується інтегральний показник ефективності СРЗ ТСО, який визначається з виразу

$$TCO = OPEX \cdot T + CAPEX, \quad (7)$$

де $OPEX$ (Operational Expenditures) – питомі операційні витрати, T – період розрахунку сукупної вартості володіння, $CAPEX$ (Capital Expenditure) – капітальні витрати.

Для визначення експлуатаційних витрат враховуються тільки ті стани, які призводять до вартісних витрат на ТО, тобто стани Z_2 , Z_3 і Z_4 . Тоді операційні витрати під час експлуатації ЗМ визначаються за формулою

$$OPEX_{\text{ЗМ}} = \sum_{i=2}^4 C_i p_i, \quad (8)$$

де C_i ($i = 2, \dots, 4$) – середні питомі витрати в одиницю часу, які пов'язані з перебуванням ЗМ в станах Z_i ($i = 2, \dots, 4$), у.о./год; p_i ($i = 2, \dots, 4$) – імовірності знаходження ЗМ в одному зі станів за цикл регенерації, які розраховуються як $p_i = M[T_i] / M[T_0]$.

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

$$CAPEX_{3M} = Q + Qn + Qq, \quad (9)$$

де Q – вартість одного ЗМ.

Тоді експлуатаційні витрати визначаються підставленням виразів (8) і (9) у (7):

$$TCO_{CM} = T \sum_{i=2}^4 C_i p_i + (Q + Qn + Qq). \quad (10)$$

Експлуатаційні витрати при експлуатації системи, що складається з m основних, n резервних і q запасних ЗМ, розраховуються за формулою:

$$TCO = RmT \sum_{i=3}^4 C_i p_i + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} + \sum_{l=1}^q Q_{l,k} F_{l,k} \right],$$

де R – 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.

У роботі отримано аналітичні вирази для оцінки оперативних витрат для послідовної, паралельної, змішаних структур і структури « k із m ». Запропоновано методи визначення експлуатаційних витрат у період гарантійного та післягарантійного термінів обслуговування обладнання СРЗ. Для цього введено ще один стан Z_5 – простій системи внаслідок незадоволення вимоги на запасний ЗМ. Тоді середній цикл регенерації визначається за формулою

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

Отримано вирази для розрахунку експлуатаційних витрат без урахування резервування ЗМ в період гарантійного терміну обслуговування (ГТО)

$$TCO = RmT \left\{ C_{\text{ПДКП}} P_{2,0} + (C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) (P_{3,0} + P_{4,0}) + C_{\text{ЗЗМ}} P_{5,0} \right\} + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right]$$

та для резервованого обладнання

$$TCO = RT \sum_{i=1}^m \left[C_{\text{ПДКП}} (P_{2,0})^{n_i} + C_{\text{ЗЗМ}} (P_{5,0})^{n_i} \right] + (m+n)(C_{\text{ДМ}} + C_{\text{ТР}}) (P_{3,0} + P_{4,0}) + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right],$$

де m – число експлуатованих ЗМ, які мають гарантії в період ГТО; n – кількість резервних ЗМ; $C_{\text{ПДКП}}$ – вартість простою обладнання через проведення ПДКП; $C_{\text{ДМ}}$ – вартість робіт з демонтажу / монтажу ЗМ i -го типу; $C_{\text{ТР}}$ – вар-

тість транспортування ЗМ i -го типу в сервісний центр для ремонту і назад; $C_{ЗЗМ}$ – вартість простою обладнання через відсутність запасних ЗМ i -го типу; $M[T_0]$ – середній цикл регенерації; $P_{2,0} = M[T_2] / M[T_0]$, $P_{3,0} = M[T_3] / M[T_0]$, $P_{4,0} = M[T_4] / M[T_0]$ і $P_{5,0} = M[T_5] / M[T_0]$ – імовірності знаходження ЗМ в станах непрацездатності, відновлення і простою внаслідок відсутності ЗЗМ відповідно.

Отримано вирази для розрахунку експлуатаційних витрат без урахування резервування ЗМ в період післягарантійного терміну обслуговування (ПГТО)

$$TCO = RmT \left\{ C_{ПДКП} P_{2,0} + (C_{ДМ} + C_{ТР} + C_{ВІД}) (P_{3,0} + P_{4,0}) + C_{ЗЗМ} P_{5,0} \right\} + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} + \sum_{l=1}^q Q_{l,k} F_{l,k} \right]$$

та для резервованих ЗМ

$$TCO = RT \sum_{i=1}^m \left[C_{ПДКП} (P_{2,0})^{n_i} + C_{ЗЗМ} (P_{5,0})^{n_i} \right] + (m+n)(C_{ДМ} + C_{ТР} + C_{ВІД})(P_{3,0} + P_{4,0}) + \sum_{k=1}^M \left[\sum_{i=1}^m Q_{i,k} L_{i,k} + \sum_{j=1}^n Q_{j,k} N_{j,k} \right],$$

де $C_{ВІД}$ – витрати на післягарантійне обслуговування; q – кількість запасних ЗМ.

Далі запропоновано критерій для визначення прийняттого варіанта експлуатаційного резервування і кількості запасних ЗМ обладнання СРЗ в період гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування. Вибір прийняттого варіанта проведено за критерієм ефективності експлуатації СРЗ із розв'язання прямої задачі: $\max_{n,q} K_{\Gamma}(n, q)$ при $TCO(n, q) \leq TCO_{\text{доп}}$, а також із

розв'язання оберненої задачі: $\min_{n,q} TCO(n, q)$ при $K_{\Gamma}(n, q) \geq K_{\Gamma, \text{доп}}$, де n, q –

кількість резервних і запасних ЗМ відповідно; $TCO(n, q)$ – значення повних експлуатаційних витрат; $TCO_{\text{доп}}$ – допустиме значення повних експлуатаційних витрат; $K_{\Gamma, \text{доп}}$ – допустиме значення K_{Γ} .

У четвертому розділі проведено практичну апробацію розроблених у роботі математичних моделей і методів. Показано, що для зниження експлуатаційних і капітальних витрат при заданому коефіцієнті готовності необхідно обрати прийнятний варіант кількості резервних і запасних компонентів або зйомник модулів обладнання СРЗ.

Розроблено методику оцінювання готовності обладнання СРЗ. Розрахова-

но коефіцієнти готовності нерезервованого і резервованого обладнання СРЗ на прикладі вузлів платформи U-SYS. Запропонована методика дає змогу оцінити коефіцієнт готовності 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. Показано, що рівень готовності, який заявляється виробниками обладнання, не завжди відповідає дійсності (що підтверджується компаніями, які експлуатують СРЗ) і дана методика дозволяє на теоретичному рівні уточнити необхідну кількість резервних і запасних ЗМ для забезпечення необхідного рівня готовності обладнання СРЗ.

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 практично не впливають на повні експлуатаційні витрати. Значення капітальних витрат визначаються вартістю основних і резервних ЗМ при закупівлі обладнання.

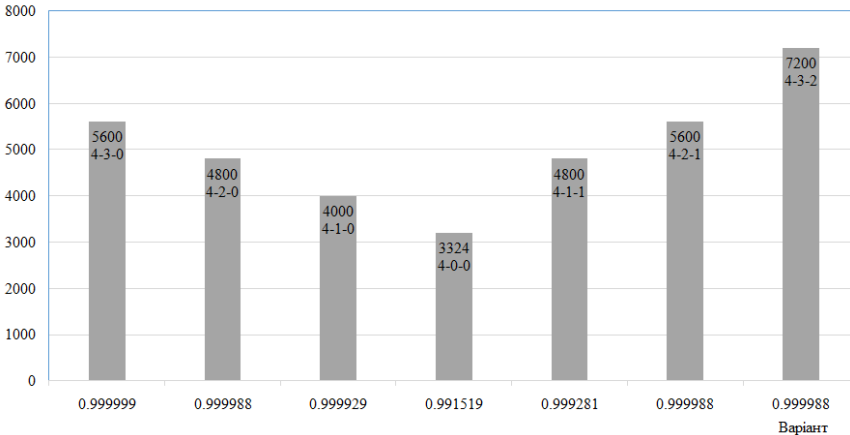
Визначено методику оцінювання повних експлуатаційних витрат у період післягарантійного терміну обслуговування обладнання СРЗ. Аналіз результатів розрахунку повних експлуатаційних витрат у період ПГТО показав, що при дублюванні ЗМ оперативні витрати ОРЕХ зменшуються на 70–85 %, однак використання резервних і запасних ЗМ збільшує капітальні витрати CAPEX на 15–50 %.

Запропоновано методику вибору прийняттого варіанта кількості резервних і запасних ЗМ, яка, на відміну від відомих, дозволяє проводити вибір за критеріями мінімуму експлуатаційних витрат в разі обмеження на коефіцієнт готовності або максимуму коефіцієнта готовності при обмеженні на експлуатаційні витрати в періоди як гарантійного, так і післягарантійного термінів обслуговування. Як видно з рисунка, обмежуючи значення $K_{г,доп}$, можна визначити мінімальне значення ТСО і навпаки.

Так, при необхідному КГ $K_{г,доп} = 0,9999$ прийнятним буде варіант 4–1–0 з мінімальним значенням повних експлуатаційних витрат ТСО = 4000 у.о. і $K_г = 0,999929$, тоді як при варіанті 4–2–1 і $K_г = 0,999988$ значення ТСО будуть більше і становитимуть 5600 у.о.

Проведено верифікацію розроблених математичних моделей. Розроблено імітаційний алгоритм і програму статистичного моделювання процесу технічної експлуатації обладнання СРЗ. Розроблений алгоритм дозволяє, на відміну від відомих алгоритмів, імітувати значення середнього часу знаходження ЗМ в станах працездатності, непрацездатності та відновлення, а також коефіцієнта готовності при різних значеннях інтенсивностей відмов і повноти контролю.

TCO, y.o.



Гістограма залежності TCO і КГ від різних варіантів структурного резервування

Показано, що результати імітаційного моделювання та аналітичні розрахунки показників 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.

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

У **додатках** наведено список публікацій здобувача та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, яка має важливе наукове і практичне значення та полягає в розробленні математичних моделей процесу ТО обладнання СРЗ для оцінювання готовності обладнання систем радіозв'язку та методів, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації систем за рахунок зниження експлуатаційних витрат при підтримці належного рівня готовності систем. У процесі виконання дисертаційної роботи отримано такі основні результати:

1. Проведено аналіз відомих математичних моделей процесу ТО обладнання і техніко-економічних показників оцінювання ефективності експлуатації СРЗ. Обґрунтовано необхідність розроблення математичних моделей процесу ТО обладнання СРЗ і вдосконалення методу оцінювання повних експлуатаційних витрат, які повинні враховувати особливості процесу безперервного контролю технічного стану обладнання сучасних СРЗ, повноти 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 методичку 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 OPEX зменшуються на 70–85 %, що в сукупності підвищує ефективність експлуатації СРЗ.

10. Запропоновано методику вибору прийняттого 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 у провідних організаціях і їхнє експериментальне дослідження підтвердило достовірність і працездатність розроблених методів, математичних моделей і методик, теоретичних положень і висновків дисертаційної роботи. Отримані в рамках дисертації результати можуть бути використані при розробленні, експлуатації та технічному обслуговуванні СРЗ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ulansky V. V. Availability modeling of a digital electronic system with intermittent failures and continuous testing. *Engineering Letters* / V. V. Ulansky,

I. E. Terentyeva. – 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* / И. Е. Терентьева. – 2016. – № 1. – С. 113–119.

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

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

5. Габрусенко Е. И. Методы формирования и оценки параметров кластера в сотовых системах мобильной связи. *Водний транспорт* / Е. И. Габрусенко, А. Г. Тараненко, И. Е. Терентьева // *Збірник наукових праць Київської державної*

вної академії водного транспорту ім. гетьмана П. Конашевича-Сагайдачного. – К. : КДАВТ, 2014. – № 3(21). – С. 31–36.

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

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

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

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

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

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

12. Терентьева І. Є. Показники оцінки ефективності структурної збитковості обладнання UMTS / І. Є. Терентьева // *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.

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

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

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

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

17. Мачалин И. А. Комбинированные методы резервирования оборудования телекоммуникационных систем / И. А. Мачалин, И. Е. Терентьева // 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.

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

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

АНОТАЦІЯ

Терентьева И. Е. Методи і моделі забезпечення готовності обладнання систем радіозв'язку. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний авіаційний університет, Київ, 2017.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу щодо розроблення математичних моделей процесу ТО обладнання СРЗ для оцінювання готовності обладнання СРЗ та методів, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації СРЗ за рахунок зниження експлуатаційних витрат за підтримки належного рівня готовності систем. Уперше розроблено математичні моделі процесу технічного обслуговування нерезервованого та резервованого обладнання СРЗ, охопленого безперервним контролем працездатності, які, на відміну від відомих, одночасно враховують вплив явних, прихованих і повторювальних відмов, а також повноти контролю і повного додаткового контролю на готовність при довільному законі напрацювань обладнання до відмов. Моделі дозволяють оцінити готовність обладнання СРЗ як на нескінченному, так і на кінцевому інтервалах часу експлуатації, а саме в періоди гарантійного та післягарантійного термінів обслуговування.

Удосконалено методи оцінювання повних експлуатаційних витрат у періоди гарантійного і післягарантійного термінів обслуговування, які, на відміну від відомих, 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 мінімумі експлуатаційних витрат. Отримані в рамках дисертації результати можуть бути використані при розробленні, експлуатації та технічному обслуговуванні сучасних СРЗ.

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

АННОТАЦІЯ

Терентьева И. Е. Методы и модели обеспечения готовности систем радиосвязи. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Национальный авиационный университет, Киев, 2017.

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная задача, которая заключается в разработке методов и моделей обеспечения готовности оборудования систем радиосвязи (СРС). Разработанные модели и методы позволяют повысить эффективность эксплуатации СРС за счет снижения эксплуатационных расходов при поддержке надлежащего уровня готовности систем. В работе проведен анализ известных математических моделей процесса ТО оборудования СРС и технико-экономических показателей оценки эффективности эксплуатации СРС. Обоснована необходимость в разработке математических моделей процесса ТО оборудования СРС и совершенствовании метода оценки готовности и полных эксплуатационных расходов, которые должны учитывать особенности процесса эксплуатации оборудования СРС. Впервые разработаны математические модели процесса технического обслуживания нерезервированного и резервированного оборудования СРС, охваченного непрерывным контролем работоспособности, которые, в отличие от известных, позволяют одновременно учитывать влияние явных, скрытых повторяющихся отказов, а также полноту контроля и полного дополнительного контроля на готовность при произвольном законе наработок оборудования до отказов. Модели позволяют оценить эффективность процесса ТО как на бесконечном, так и на конечном интервалах времени эксплуатации, а именно в периоды гарантийного и послегарантийного сроков обслуживания.

Усовершенствованы методы оценки полных эксплуатационных расходов в периоды гарантийного и послегарантийного сроков обслуживания, которые, в отличие от известных, учитывают виды эксплуатационного резервирования и позволяют определить приемлемый вариант эксплуатационного резервирования и количество запасных модулей при максимуме коэффициента готовности и ограничении на эксплуатационные расходы или при ограничении на коэффициент готовности и минимуме эксплуатационных расходов.

Полученные в рамках диссертации результаты могут быть использованы при разработке, эксплуатации и техническом обслуживании современных СРС.

Ключевые слова: системы радиосвязи, готовность, техническое обслуживание, резервирование, полные эксплуатационные расходы, запасные части, гарантийное и послегарантийное обслуживание, внезапный отказ, перемежающийся отказ, непрерывный контроль работоспособности, полнота контроля, регенерирующий процесс.

ABSTRACT

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

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

In the dissertation the actual scientific and applied problem is solved which consists in the developing of the methods and models of ensuring the availability of radio systems equipment. The developed models and methods allow to increase the efficiency of operation and maintenance of the radio systems by the reduction of operational expenditures while providing the appropriate level of system availability. For the first time, the mathematical models of the operation and maintenance process of a non-redundant and redundant equipment of a continuously tested radio systems are developed which, in opposite to the known ones, allow to take into account the impact of the revealed, unrevealed, and intermittent failures on the system availability under arbitrary failure distributions. The developed models allow the evaluation of the operation and maintenance process efficiency for both infinite and finite time interval.

The methods for assessing total operational expenditures during the warranty and post-warranty period of service are improved. The methods allow to determine 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. The results of dissertation can be used in the design, operation and maintenance of radio systems.

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

Підп. до друку 29.01.2018. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,25. Обл.-вид. арк. 1,16.
Тираж 100 пр. Замовлення № -1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002