

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КОЗАЧУК ОКСАНА ДМИТРІВНА



УДК 629.735.083.02/06(042/3)

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Костановський Валерій Вікторович,
Державне підприємство «НДІ «Квант», м. Київ,
начальник науково-дослідного відділу надійності та стандартизації.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Петрашевський Олег Львович,
Національний транспортний
університет, м. Київ
професор кафедри аеропортів;

доктор технічних наук, професор
Богом'я Володимир Іванович,
Державний університет
інфраструктури та технологій, м. Київ,
професор кафедри технічних систем
та процесів управління в судноводінні.

Захист відбудеться «12» травня 2021 р. о 14.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради – Д 26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Із дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розіслано «02» квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради



Н.С. Кузьменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. В останні роки бурхливий розвиток отримали радіоелектронні системи (РС) з активними фазованими антенними решітками (АФАР). З 2000 року почалося активне впровадження арсенід-галієвих технологій (GaAs) надвисокочастотних (НВЧ) монолітних інтегральних схем (МІС) в діючі системи озброєння. Першими стали радіолокаційні станції (РЛС) винищувальної авіації і системи протиракетної оборони (ПРО). В якості напівпровідникового матеріалу НВЧ МІС для АФАР наступного покоління був обраний нітрид галію (GaN), який перевершує GaAs за напругою, тепловими характеристиками і енергоефективністю. У даний час ступінь готовності GaN-технології в США повністю відповідає вимогам серійного військового виробництва. Це дозволяє відмовитися від використання GaAs в якості базового матеріалу МІС ПП-модулів для АФАР нових систем озброєння і замінити антенні GaAs решітки в діючих системах на GaN решітки. АФАР радіоелектронних систем не тільки технологічно складні, але і дуже затратні, тому останнім часом однією з головних тенденцій стають пошуки шляхів зниження їх вартості за рахунок спрощення методів конструювання і використання комерційних технологій. Вже з'явилися пропозиції щодо створення недорогих РС з АФАР, що вирішують завдання супутникового зв'язку, метеоспостережень, управління повітряним рухом, стеження за безпілотними об'єктами тощо.

З огляду на вищезгадане для забезпечення економічної ефективності РС з АФАР є розроблення адекватних математичних моделей оцінки надійності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами

Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з науковими дослідженнями і дослідно-конструкторськими роботами, які проводилися в ДП «НДІ «Квант» і спрямовані на розробку та подальше вдосконалення моделей оцінки надійності радіоелектронних систем з АФАР. Здобувачка починаючи з 2008 р брала активну участь у всіх розробках ДП «НДІ «Квант» і ДП «НДІ «Квант-Радіолокація», як фахівець з оцінки показників надійності і ефективності ТО складних систем.

Технічний проект РЛС «Фенікс», у рамках ДКР «Простір-Ф», номер державної реєстрації РК0108U000066Т, 2012 р.

Концептуальний проект «Пересувного радіолокаційного поста багатофункціональної станції супроводу і наведення малої дальності зенітного ракетного комплексу» - децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р.

Концептуальний проект «Пересувного радіолокаційного поста багатофункціональної станції супроводу і наведення середньої дальності зенітного ракетного комплексу» - децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р.

Ескізний проект «Пересувного радіолокаційного поста багатофункціональної станції супроводу і наведення малої дальності зенітного ракетного комплексу» – децимальний номер ZRS KRL ANL 001 06 2017 р.

Ескізний проект «Пересувного радіолокаційного поста багатофункціональної станції супроводу і наведення середньої дальності зенітного ракетного комплексу» - децимальний номер ZRS KRL ANL 001 07 2017 р.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення та удосконалення математичних моделей оцінки надійності радіоелектронних систем з активними фазованими антенними решітками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні науково-технічні завдання:

– розробити та дослідити моделі апроксимації кривих інтенсивностей відмов електрорадіовиробів з використанням відомих розподілів відмов: експоненціального, Вейбулла і дифузійного немонотонного розподілів, що адекватно враховують довідкову статистичну інформацію про раптові і поступові відмови;

– розробити та дослідити моделі оцінки надійності АФАР радіоелектронних систем при спільному проявленні раптових і поступових відмов каналів і модулів антенної решітки з використанням відомих розподілів відмов;

– розробити математичну модель оцінки надійності АФАР в залежності від температури активної зони кристала GaN мікромодулів та визначати середній наробіток до відмови активної фазованої антенної решітки радіоелектронних систем;

– розробити метод визначення вимог до середнього наробітку до відмови каналів та модулів АФАР радіоелектронних систем.

Об’єкт дослідження – оцінка надійності радіоелектронних системи з активними фазованими антенними решітками.

Предмет дослідження – математичні моделі оцінки надійності радіоелектронних систем з активними фазованими антенними решітками.

Методи дослідження базуються на апараті теорії імовірності і математичної статистики, теорії надійності складних систем, теорії випадкових процесів та методах статистичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі було вирішене наукове завдання, що ґрунтується на розробленні математичних моделей оцінки надійності радіоелектронних систем з активними фазованими антенними решітками, що дозволило визначити нові підходи до проектування радіоелектронних систем.

Вперше розроблені математичний метод та моделі апроксимації інтенсивностей раптових і поступових відмов радіоелектронних систем, які відрізняються від існуючих впровадженням експоненціального, Вейбулла і дифузійного немонотонного розподілів та композиції розподілів відмов і

можуть бути використані у процесі проектування та розробки каналів і модулів антенної решітки радіоелектронних систем.

Вперше розроблено математичні моделі оцінки надійності АФАР з одно рівнявою та дворівневою структурними схемами надійності, які дозволяють отримувати оцінки надійності радіоелектронних систем з АФАР.

Вперше розроблені та досліджені моделі надійності АФАР за різними розподілами відмов приймально-передавальних каналів (ППК), що характеризують прояв раптових і поступових відмов, які дозволяють отримати значний вигравш у порівнянні з використанням експоненціального розподілу відмов ППК.

Вперше розроблений метод та математична модель оцінки надійності АФАР радіоелектронних систем в залежності від температури активної зони кристалів GaN (нітриду галію) мікромодулів, що дозволяють вибрати оптимальну структуру системи рідинного охолодження.

Вдосконалені і досліджені показники надійності активних фазованих антенних решіток радіоелектронних систем з 10 % і 20 % надмірністю для елементів розподільної структури, які характеризуються довільними підрозділами відмов.

Окрім цього у роботі було вдосконалено метод визначення вимог до показників надійності каналів і модулів АФАР, який дозволяє зменшити витрати на проектування радіоелектронних систем.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень

Підтверджується коректним використанням сучасного математичного апарату, використанням наукових положень математичної теорії надійності складних систем, теорій імовірності, теорій імовірних процесів.

Практичне значення отриманих результатів

Результати, отримані в дисертації, дозволяють вирішити складне завдання, яке полягає у розробленні адекватних математичних моделей оцінки надійності радіоелектронних систем з АФАР. При цьому, отримані результати дозволяють:

- визначати потрібні моделі апроксимації кривих інтенсивностей відмов напівпровідникових НВЧ транзисторів і модулів з урахуванням раптових і поступових відмов на основі довідкової статистичної інформації з довідників щодо надійності електрорадіовиробів;

- вибирати потрібні моделі оцінки і визначати показники надійності радіоелектронних систем з АФАР, що розробляються на етапах ескізного, технічного та робочого проектування;

- визначати вплив температури активної зони кристала GaN транзисторів і мікросхем випромінюючих каналів на показники надійності АФАР радіоелектронних систем;

- визначити необхідні вимоги до показників надійності каналів і модулів АФАР радіоелектронних систем.

Практична цінність роботи відображена в наступних матеріалах:

– у концептуальному проекті (децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р.) і ескізному проекті (децимальний номер: ZRS RVN ANL 00106, 2017 р.) «Пересувного радіолокаційного поста багатофункціональної станції супроводу і наведення малої дальності зенітного ракетного комплексу» – розрахунки показників надійності АФАР і БСЧН ЗРК. Замовник: КБ «Південне»;

– у технічному проекті ОКР «Простір-Ф» – розрахунки показників надійності АФАР «Фенікс» (ФІЯЕ. 461321.004, номер державної реєстрації РК0108U000066Т). Замовник МОУ України;

– у концептуальному проекті (децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р.) і ескізному проекті (децимальний номер: ZRS RVN ANL 00107 2017 р.) «Пересувного радіолокаційного поста багатофункціональної станції супроводу і наведення середньої дальності зенітного ракетного комплексу» – розрахунки показників надійності АФАР і БСЧН ЗРК. Замовник: КБ «Південне».

Матеріали дисертаційної роботи були впроваджені у Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут «Квант» та Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут «Квант-Радіолокація».

Особистий внесок здобувача

Постановка мети та завдань, обговорення результатів проведені разом з науковим керівником.

Наукові роботи [3, 18, 19] виконані самостійно. З робіт, що опубліковані у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належить: у роботі [1] – розроблення програми розрахунку методу технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіоелектронних систем за фактичним станом; у роботі [2] – розроблення математичних моделей оцінки показників надійності активних фазованих антенних решіток з одно рівнявою і дворівневою структурною схемою надійності; у роботі [4] – розроблення математичної моделі прогнозування показників безвідмовності та довговічності електрорадіовиробів; у роботі [5] – розроблення програми розрахунків для імовірнісного аналізу електронних модулів і активних фазованих антенних решіток; у роботі [6] – проведений критичний аналіз технологій прогнозування надійності електронних систем з використанням експоненціального та дифузійного немонотонного розподілів елементів, що відмовили; у роботі [7] – отримані програми для визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування групи активних фазованих антенних решіток; у роботі [8] – розроблені математичні моделі апроксимації кривих інтенсивностей відмов електрорадіовиробів дифузійним немонотонним розподілом, розподілом Вейбулла, експоненціальним розподілом і композицією розподілів; у роботі [9] – розроблені програми для оцінки показників надійності активної фазованої антенної решітки; у роботі

[10] – розроблені програми для оцінки середнього наробітку на відмову; у роботі [11] – складена програма для розрахунків аналітичних виробів алгоритму технічного обслуговування за фактичним станом; у роботі [12] – розроблені методи для визначення вимог до показників надійності каналів і модулів активної фазованої антенної решітки радіоелектронних систем; у роботі [13] – представлено показники безвідмовності і довговічності електрорадіовиробів корабельних радіоелектронних систем за статистичними даними; у роботі [14] – представлено оцінки показників надійності електрорадіовиробів країн ближнього і далекого зарубіжжя; у роботі [15] – представлено аналітичні вирази для розрахунку середнього та залишкового ресурсу корабельних радіоелектронних комплексів; у роботі [16] – представлено оцінку показників надійності оптоелектронної елементної бази; у роботі [17] – представлено оцінку показників надійності електрорадіовиробів радіоелектронних систем в зарубіжних довідниках.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та ухвалені на таких конференціях:

– Науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» у 2010 р. у м. Київ;

– II науковій конференції «Проблеми експлуатації і розвитку ракетно-артилерійського озброєння військово-морських сил України» у 2011 р. у м. Севастополь;

XII міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» у 2013 р. в м. Київ;

Міжнародній науковій конференції «Статистичні методи обробки сигналів і даних» у 2013 р. в м. Київ;

Науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку навігації, спостереження та організації повітряного руху GNS/ATM» у 2014 р. в м. Київ.

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковані у 19 наукових працях, у тому числі: 12 статей у виданнях, що внесені до переліку наукових фахових видань України та входять до міжнародних наукометричних баз. 2 статті опубліковано у журналах, що входять до наукометричної бази Scopus (1 з яких включена до категорії "A" Переліку фахових видань України) та 7 роботах у збірниках матеріалів і праць наукових конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 149 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 124 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 13 таблицями, 40 рисунками. Список використаних джерел містить 130 найменування, з них 90 кирилицею та 40 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі дисертаційної роботи представлені коротка характеристика радіоелектронних систем з активними фазованими антенними решітками (АФАР), аналіз методів відмов і моделей надійності електрорадіовиробів та методи оцінки показників надійності радіоелектронних систем, які проектуються.

Провідні країни світу широко застосовують АФАР під час розроблення нових радіоелектронних систем: в наземних і корабельних РЛС ППО і ПРО, а також РЛС у військовій авіації. Широке застосування АФАР дістали під час реалізації космічних технологій - в супутникових системах зв'язку.

У роботах вітчизняних та закордонних фахівців відзначається, що широко поширений американський стандарт MIL-HDBK-217, заснований на використанні експоненціального розподілу, не призначений для того, щоб забезпечити показники надійності з гарантованою точністю. Швидше, він призначений для використання в якості інструменту під час оцінки придатності і порівняння варіантів нових проектів.

Проведений аналіз моделей відмов ЕРВ та експериментальних даних показав, що під час розроблення математичних моделей для характеристики різних типів відмов НВЧ транзисторних каналів, модулів, мікромодулів та вторинних джерел живлення радіоелектронних систем доцільно використовувати такі типи розподілів:

- експоненціальний розподіл (для характеристики раптових відмов ЕРВ);
- дифузійний немонотонний, нормальний і Вейбулла розподіли (для характеристики поступових відмов ЕРВ);
- композицію експоненціального і одного з трьох розподілів – дифузійного немонотонного, нормального або Вейбулла (для характеристики спільного прояву раптових і поступових відмов транзисторних модулів і вузлів).

Визначені недоліки застосування математичної моделі розрахунку надійності резервованої невідновлювальної структури із ковзаючим гарячим резервом для оцінки надійності надмірних радіоелектронних систем типу АФАР.

Недоліками розглянутої моделі оцінки надійності є:

- неможливість використовувати для оцінки надійності будь-які інші, (крім експоненціального) розподіли відмов елементів;
- визначення точного значення середнього наробітку до відмови тільки для 250–300 елементів.

Так як сучасні АФАР РС можуть налічувати від кількох до десятків тисяч приймально-передавальних модулів і розподіл відмов модулів може відрізнитися від експоненціального, то для оцінки надійності радіоелектронних систем з АФАР необхідно розробити нові більш адекватні математичні моделі оцінки надійності.

Короткий огляд показав, що у світовій практиці проектування під час оцінки показників надійності радіоелектронних систем використовується, в

основному, експоненціальний розподіл відмов елементів. З огляду на недоліки експоненціального розподілу відмов і фізику відмов НВЧ транзисторів і мікромодулів, пропонується при оцінці надійності радіоелектронних систем з АФАР використовувати не тільки експоненціальний розподіл для обліку раптових відмов елементів, але й розподіли, що враховують поступові відмови елементів: нормальний, Вейбулла і дифузійний немонотонний. Використання технології імовірнісно-фізичного аналізу надійності може дозволити отримати великий економічний ефект, зменшивши вартість розробки РС з АФАР на 15–30 %.

Другий розділ присвячено розробленню математичних моделей апроксимації інтенсивностей раптових і поступових відмов електрорадіовиробів з використанням експоненціального розподілу, дифузійного немонотонного розподілу, розподілу Вейбулла та композиції розподілів.

У довідниках щодо надійності електрорадіовиробів (ЕРВ) наводиться інформація про показники безвідмовності (інтенсивності раптових і поступових відмов) і показники довговічності ЕРВ (мінімальний наробіток і гамма-відсотковий ресурс). Для забезпечення апроксимації кривих інтенсивності відмов ЕРВ з різними імовірнісними розподілами відмов розроблені аналітичні залежності параметрів моделей надійності ЕРВ від характеристик статистичних даних з відмов ЕРВ, представлених у довіднику щодо надійності.

Аналізування довідників з надійності ЕРВ показало, що для напівпровідникових елементів (діодів, транзисторів і модулів) має місце від 45 % до 80 % поступових відмов. На жаль у практиці проектування радіоелектронних пристроїв і систем в якості моделі надійності ЕРВ використовується тільки експоненціальний розподіл і всі експлуатаційні відмови ЕРВ вважаються раптовими. Інформація про поступові відмови та показники довговічності ЕРВ під час розроблення математичних моделей надійності не використовується. Для отримання більш точних розрахункових оцінок показників надійності РС з ФАР необхідно застосовувати більш адекватні моделі надійності ЕРВ, що враховують показники безвідмовності і довговічності.

Побудова математичних моделей надійності ЕРВ, що враховують одночасно показники безвідмовності і довговічності, можлива за використання композиції двох розподілів. В якості першого розподілу пропонується застосувати експоненціальний розподіл (однопараметричний), що враховує раптові відмови, а в якості другого розподілу (один з трьох двопараметричних розподілів) – нормальний, Вейбулла або дифузійний немонотонний, які враховують поступові відмови. Якщо експлуатаційна інтенсивність відмов ЕРВ характеризується тільки поступовими відмовами, то в якості математичної моделі надійності ЕРВ доцільно використовувати дифузійний немонотонний розподіл.

Розроблена та досліджена математична модель апроксимації кривої інтенсивності поступових відмов ЕРВ, яка використовує дифузійний немонотонний розподіл (DNR) у вигляді системи нелінійних рівнянь

$$\lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} = \frac{\frac{1}{vz\sqrt{2\pi zx}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{2v^2zx}\right]}{T_\gamma \left[\Phi\left(\frac{1-zx}{v\sqrt{zx}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+zx}{v\sqrt{zx}}\right) \right]} \quad (1)$$

$$\ln \left[\Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{x+1}{v\sqrt{x}}\right) \right] - \ln \gamma = 0.$$

Для цього внесені наступні значення:

$$t_{\text{Н.М.}} = zT_\gamma, \quad x = \frac{T_\gamma}{T_{0_DNR}}, \quad zx = \frac{t_{\text{Н.М.}}}{T_{0_DNR}}. \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} = \lambda_{\text{ПОСТ.ВІДМ.}} \quad (3)$$

Розроблена та досліджена математична модель апроксимації кривої інтенсивності відмов ЕРВ на основі композиції двох розподілів: експоненціального і дифузійного немонотонного розподілу у вигляді нелінійного рівняння:

$$\alpha_2 \frac{\frac{1}{vz\sqrt{2\pi zx}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{2v^2zx}\right]}{\left[\Phi\left(\frac{1-zx}{v\sqrt{zx}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+zx}{v\sqrt{zx}}\right) \right]} + \frac{\left[\Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{x+1}{v\sqrt{x}}\right) \right] - \ln \gamma}{\alpha_1} = 0. \quad (4)$$

Для цього внесені наступні значення:

$$t_{\text{Н.М.}} = zT_\gamma, \quad x = \frac{T_\gamma}{T_{0_DNR}}, \quad zx = \frac{t_{\text{Н.М.}}}{T_{0_DNR}}; \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} = \alpha_1 \lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}}, \quad \lambda_{\text{ПОСТ.ВІДМ.}} = \alpha_2 \lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}}; \quad (6)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1,00. \quad (7)$$

Для рішення нелінійного рівняння використовувалися численні методи і побудова п'яти номограм. Рівняння (4) вирішується чисельними методами щодо змінної для різних значень $v, \gamma, z, \alpha_1, \alpha_2$ або побудовою номограм.

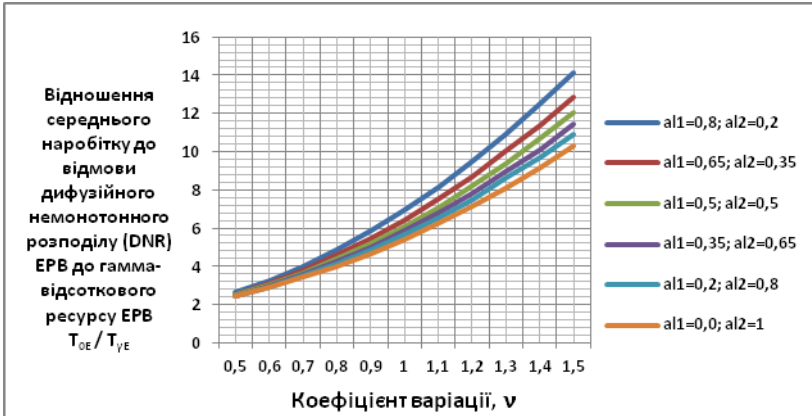


Рисунок 1. Номограма для визначення ставлення середнього наробітку до відмови ЕРВ до гамма-відсоткового ресурсу ЕРВ для DN-розподілу в залежності від коефіцієнта варіації для композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів за різними значеннями коефіцієнтів α_1 ($a1$) і α_2 ($a2$)

Розроблена та досліджена математична модель апроксимації інтенсивності відмов ЕРВ з використанням композиції двох розподілів – експоненціального і нормального у вигляді системи двох нелінійних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} &= -\frac{1}{T_\gamma} \ln \frac{\gamma}{1 - \Phi\left(\frac{x-1}{v}\right)}, \\ \lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} T_\gamma &= \frac{\frac{x}{v\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{2v^2}\right]}{1 - \Phi\left(\frac{zx-1}{v}\right)} + T_\gamma \lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Система рівнянь (8) вирішується чисельними методами або за допомогою двох номограм.

Розроблена та досліджена математична модель апроксимації інтенсивності відмов ЕРВ з використанням композиції двох розподілів – експоненціального та Вейбулла у вигляді системи нелінійних рівнянь.

Система рівнянь (9) вирішується чисельними методами або за допомогою двох номограм.

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} + \lambda_{\text{ПОСТ.ВІДМ.}} &= \lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} + \frac{b}{a} \left(\frac{t_{\text{Н.М.}}}{a}\right)^{b-1} \\ \gamma &= \exp \left\{ - \left[\lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} t_\gamma + \left(\frac{t_\gamma}{a}\right)^b \right] \right\} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Приклад 1. Приклад використання композиції розподілів для побудови апроксимації інтенсивності відмов потужних НВЧ транзисторів

Визначені показники надійності НВЧ транзисторів великої потужності за вихідними даними довідника щодо надійності ЕРВ і ТУ:

$$\lambda_{\text{повн.відм.}} = 0,540 \times 10^{-6} \text{ 1/год}; \lambda_{\text{рапт.відм.}} = 0,270 \times 10^{-6} \text{ 1/год.};$$

$$\lambda_{\text{пост.відм.}} = 0,270 \times 10^{-6} \text{ 1/год}$$

Для експоненціальної і трьох композиційних моделей надійності:

ER \square NR, ER \square WR, ER \square DNR. На рис. 2 представлені графіки інтенсивності відмов потужних НВЧ транзисторів.

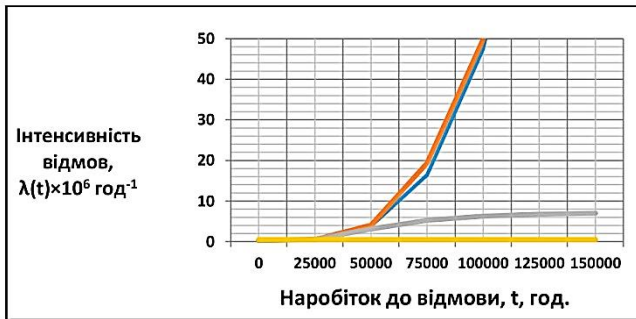


Рисунок 2. Інтенсивність відмов НВЧ транзисторів ($\lambda_{\text{повн.відм.}} = 0,540 \times 10^{-6}$ 1/год; $\lambda_{\text{рапт.відм.}} = 0,270 \times 10^{-6}$ 1/год; $\lambda_{\text{пост.відм.}} = 0,270 \times 10^{-6}$ 1/год) для різних моделей надійності: експоненціального розподілу ($\lambda_{\text{повн.відм.}} = 0,540 \times 10^{-6}$ 1/год) – фіолетовий колір; композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілу – зелений колір; композиції експоненціального і нормального розподілу – червоний колір; композиції експоненціального і розподілу Вейбулла – синій колір

Запропоновані у розділі 2 моделі апроксимації інтенсивності відмов ЕРВ

– композиції ER \square РВ і ER \square ДНР у початковий період часу, який визначається

мінімальним наробітком, є найбільш ефективними (за значенням імовірності безвідмовної роботи) порівняно з експоненціальним розподілом (модель ЕР) і дифузійним немонотонним розподілом (ДНР).

Запропоновані математичні моделі апроксимації кривих інтенсивностей ЕРВ з використанням, експоненціального та розподілу Вейбулла, експоненціального та дифузійного немонотонного розподілів дозволяють

побудувати нові математичні моделі надійності радіоелектронної апаратури, що враховують раптові і поступові відмови ЕРВ.

Третій розділ присвячено дослідженню впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності резервованих радіоелектронних систем з дробовою кратністю, розробленню математичної моделі оцінки надійності активної фазованої антенної підрешітки і АФАР за різними законами розподілу відмов приймально-передавальних каналів, та розробленню математичної моделі оцінки надійності АФАР радіоелектронних систем, що враховує зміну температури активної зони кристала GaN транзисторів і мікросхем випромінюючих каналів.

Досліджена залежність показників надійності РЛС із загальним навантаженим резервуванням з дробовою кратністю від коефіцієнта надмірності системи за різними законами розподілу часу безвідмовної роботи елементів, що враховують раптові та поступові відмови елементів: експоненціального, Вейбулла, дифузійного немонотонного, узагальненого показового та суміші розподілів (експоненціального і Вейбулла). На рис. 3 представлені графіки залежності відносного середнього наробітку до відмови від коефіцієнта надмірності резервованої системи за різними законами розподілу часу безвідмовної роботи елементів системи (експоненціальним розподілом (ЕР), розподілом Вейбулла (РВ), немонотонним дифузійним розподілом (ДНР), узагальненим показовим розподілом (УПР) та сумішшю розподілів експоненціального та Вейбулла (ЕР+РВ)).

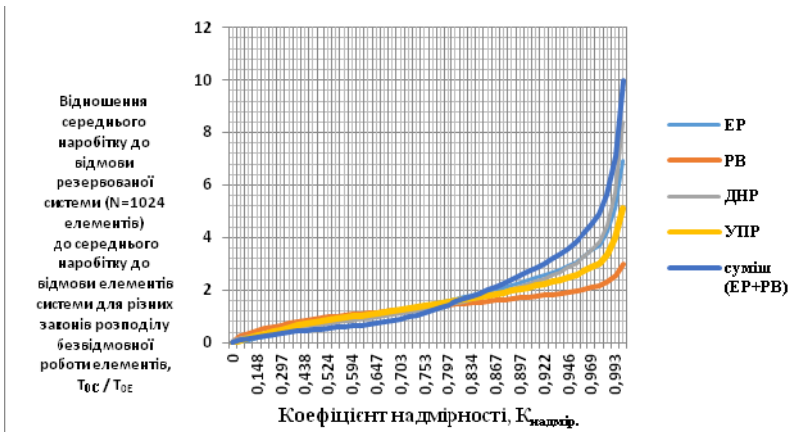


Рисунок 3. Графіки залежності відношення середнього наробітку до відмови резервованої системи (під час загального резервування із дробовою кратністю) до середнього наробітку до відмови елементів системи для різних законів розподілу часу безвідмовної роботи елементів (ЕР, РВ, ДНР, УПР, композиції розподілів експоненціального та Вейбулла (ЕР та РВ) від коефіцієнта надмірності системи ($K_{надм.}$ від 0 до 0,997)

Критерієм відмов приймально-передавальної АФАР визначено зниження відносної кількості непрацюючих ППК в АФАР до допустимого рівня.

В даний час кількість випромінюючих (передавальних) каналів у приймально-передавальній АФАР може коливатися від однієї тисячі до кількох десятків тисяч. Для забезпечення керованості НВЧ сигналів у процесі експлуатації АФАР конструктивне фрагментують на ряд підрешіток – S_0 , кожна з яких характеризується своїм значенням амплітуди і фази НВЧ сигналу для всіх приймально-передавальних каналів даної підрешітки. При цьому кожна підрешітка містить G_0 – приймально-передавальних каналів. Відповідно, загальна кількість приймально-передавальних каналів АФАР дорівнює $N_0 = G_0 S_0$. Тому для типової АФАР характерною буде дворівнева структурна схема надійності. В АФАР на передавання у ППК працюють передавальні канали, а на приймання – приймальні канали. Конструктивне, декілька ППК можуть бути зібрані в один приймально-передавальний модуль (ППМ).

Розроблена та досліджена математична модель надійності фазованої антенної решітки (АФАР з однорівневою ССН)

Середній наробіток на відмову антенної решітки визначається з вирішення наступного рівняння:

$$P_{\text{МВЖ}} (t_{\text{Відм.}} = T_0_{\text{А.ПДР.}}) P_{\text{ППК}} (t_{\text{Відм.}} = T_0_{\text{ПДР.}}) = 1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0}. \quad (10)$$

Для випадку експоненціального розподілу відмов ППК і МВЖ – середнього наробітку до відмови антенної решітки визначається за формулою:

$$\frac{T_0_{\text{ПДР.}}}{T_0_{\text{ППК.}}} = \frac{-\ln \left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0} \right)}{1 + \frac{T_0_{\text{ППК.}}}{T_0_{\text{МВЖ.}}}}; \quad (11)$$

– інтенсивності відмов

$$\lambda_{\text{ПДР.}} = - \frac{\lambda_{\text{ППК}} + \lambda_{\text{МВЖ}}}{\ln \left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0} \right)}. \quad (12)$$

Для визначення імовірності безвідмовної роботи антенної фазованої підрешітки використовується математична модель розрахунку надійності резервованої невідновлювальної структури зі змінним резервом (що складається з n – робочих і m – резервних ідентичних елементів):

$$P_{\text{ПДР.}}(t) = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [P_{\text{ППК}}(t) R_{\text{МВЖ}}(t)]^{G_0-i} [1 - P_{\text{ППК}}(t) R_{\text{МВЖ}}(t)]^i, \quad (13)$$

де $P_{\text{ППК}}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи ППК, $Q_{\text{ППК}}(t) = 1 - P_{\text{ППК}}(t)$ – імовірність відмови ППК, $R_{\text{МВЖ}}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи МВЖ, m_G – допустима кількість відмов ППК у підрешітці, G_0 – загальна кількість відмов ППК у підрешітці

На рис. 4 і 5 показані графіки відносного середнього наробітку до відмови антенної підрешітки і решітки в залежності від відносного наробітку

$$A\Phi AP - \frac{t}{T_{0_A\Phi AP}} \text{ для будь-яких значень допустимих відмов ППК}$$

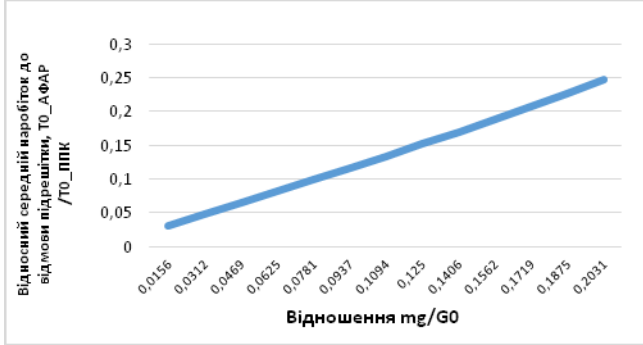


Рисунок 4. Графік залежності відносного середнього наробітку до відмови антенної підрешітки від відношення допустимого числа відмов ППК у підрешітці – m_G до загальної кількості ППК – G_0 (для $G_0 = 64$ ППК і $\lambda_{МВЖ} = 0$)

Розроблена та досліджена математична модель надійності АФАР з дворівневою структурною схемою надійності.

Середній наробіток на відмову антенної решітки $T_{0_A\Phi AP}$ визначається з вирішення наступного рівняння:

$$\begin{aligned} (\Delta N)_{доп.} + 1 &= \\ &= N_0 \left\{ 1 - P_{ППК}(T_{0_A\Phi AP_1}) P_{ППМП}(T_{0_A\Phi AP_1}) \left[P_{МВЖ}(T_{0_A\Phi AP_1}) \right]^2 \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для випадку експоненціального розподілу відмов ППК і МВЖ – відносний середній наробіток до відмови АФАР визначається за формулою:

$$\frac{T_{0_A\Phi AP_1}}{T_{0_ППК}} = - \frac{\ln \left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0 S_0} \right)}{1 + \frac{T_{0_ППК}}{T_{0_ППМП}} + \frac{2T_{0_ППК}}{T_{0_МВЖ}}}. \quad (15)$$

Формула імовірності безвідмовної роботи АФАР має вигляд:

$$\begin{aligned} P_{A\Phi AP}(t) &= \sum_{j=0}^{m_S} C_{S_0}^j \left[P_{ПІДР}(t) P_{МВЖ}(t) P_{ППМП}(t) \right]^{S_0-j} \times \\ &\times \left[1 - P_{ПІДР}(t) P_{МВЖ}(t) P_{ППМП}(t) \right]^j, \end{aligned} \quad (16)$$

де $P_{\text{ПДР}}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи антенної підрешітки, яка визначається за формулою; $Q_{\text{ПДР}}(t) = 1 - P_{\text{ПДР}}(t)$ – імовірність умовної відмови антенної підрешітки; m_s – допустима кількість умовних відмов підрешіток в АФАР; S_0 – загальна кількість підрешіток в АФАР.

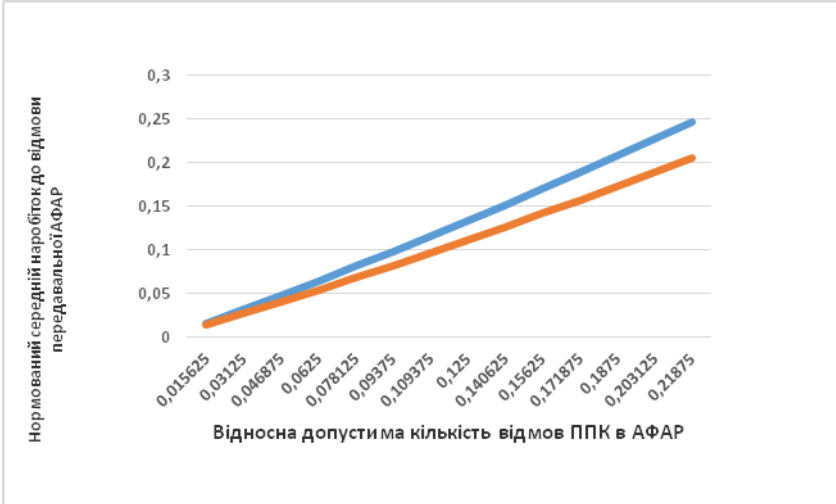


Рисунок 5. Графіки залежності відносного середнього наробітку до відмови АФАР від відносної допустимої кількості відмов в АФАР:

$$\text{а) } \frac{T_{\Theta_{\text{АФАР}_1}}}{T_{\Theta_{\text{ПЛК}}}} \text{ за } \frac{T_{\Theta_{\text{ПЛК}}}}{T_{\Theta_{\text{ПЛМЛ}}}} = 0,01; \frac{2T_{\Theta_{\text{ПЛК}}}}{T_{\Theta_{\text{МВЖ}}}} = 0,01 \quad \text{– синя лінія;}$$

$$\text{б) } \frac{T_{\Theta_{\text{АФАР}_2}}}{T_{\Theta_{\text{ПЛК}}}} \text{ за } \frac{T_{\Theta_{\text{ПЛК}}}}{T_{\Theta_{\text{ПЛМЛ}}}} = 0,1; \frac{2T_{\Theta_{\text{ПЛК}}}}{T_{\Theta_{\text{МВЖ}}}} = 0,1 \quad \text{– червона лінія}$$

Удосконалені та досліджені математичні моделі НВЧ модулів, підрешіток АФАР і решітки в цілому за різними розподілах відмов електро- радіо- виробів. При цьому розроблені та досліджені моделі надійності НВЧ модулів АФАР

Під час розроблення моделей надійності АППМ, ППМП і МВЖ використовуються моделі апроксимації ЕРВ, які побудовані на основі наступних розподілів відмов:

– експоненціального розподілу – для опису прояви раптових відмов каналів і модулів;

– дифузійного немонотонного розподілу і розподілу Вейбулла (імпульсні пристрої) – для опису прояву поступових відмов;

– композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів, а також композиції розподілу Вейбулла і дифузійного немонотонного розподілу – для опису спільного прояву раптових і поступових відмов.

Удосконалені та досліджені математичні моделі оцінки надійності передавальної АФАР під час раптових і поступових відмов НВЧ транзисторів і мікромодулів.

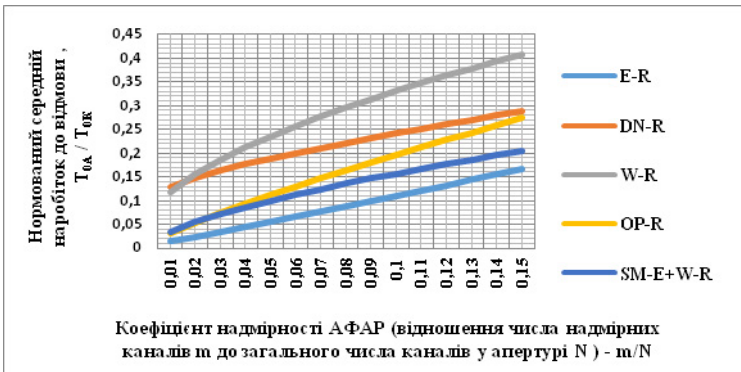


Рисунок 6. Номограма для визначення нормованого середнього наробітку до відмови АФАР, що складається із 256 модулів НВЧ, в залежності від коефіцієнта надмірності для п'яти різних законів розподілу часу до відмови НВЧ модулів

Розроблені моделі оцінки надійності АФАР радіоелектронних систем за різними розподілами відмов ППК, дозволяють отримати значне підвищення оцінки середнього наробітку до відмови АФАР. Значення середнього наробітку до відмови АФАР під час поступових відмов ППК в сім – вісім разів перевищує його значення під час раптових відмов ППК. Дослідження показали, що використання композиції розподілів для відмов ППК під час розрахунку середнього наробітку до відмови АФАР дозволяє отримати вигравш у розмірі від 40 % до 90 % в порівнянні з використанням експоненціального розподілу відмов.

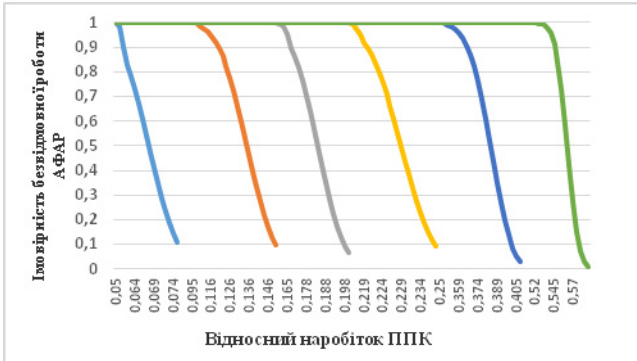


Рисунок 7. Графіки залежності імовірності безвідмовної роботи АФАР від відносного наробітку ППК для різних законів розподілу відмов: ER – графік блакитного кольору; DNR – графік коричневого кольору; ER/2*DNR/2 – графік фіолетового кольору; WR0 – графік жовтого кольору; WR1 – графік синього кольору; WR2 – графік зеленого кольору

Розроблені та досліджені методи оцінки показників надійності АФАР РЛС від температури активної зони кристала GaN транзисторів і мікросхем випромінюючих каналів.

Визначені залежності показників надійності АФАР РЛС від температури активної зони кристала GaN транзисторів приймально-передавальних модулів:

– середній час наробітку до відмови випромінюючого приймально-передавального каналу:

$$T_{0_ППК_GaN} = \frac{T_{0_ППК}(\Theta_{ref})}{\pi_{T_GaN}} \quad (17)$$

– середній час наробітку до відмови підрешітки АФАР:

$$T_{0_ПДР_GaN} = \frac{T_{0_ПДР}(\Theta_{ref})}{\pi_{T_GaN}}; \quad (18)$$

– середній час наробітку до відмови АФАР в цілому:

$$T_{0_АФАР_GaN} = \frac{T_{0_АФАР}(\Theta_{ref})}{\pi_{T_GaN}}, \quad (19)$$

де: π_T – температурний коефіцієнт моделі надійності GaN транзисторів

$$\pi_T = \exp \left[\frac{E_a}{k_0} \left(\frac{1}{\Theta_{op} + 273} - \frac{1}{\Theta_{ref} + 273} \right) \right]. \quad (20)$$

Аналіз показав (див. рис. 7) що для випадку прояву раптових відмов ППК і МВЖ в АФАР при експоненціальному розподілі відмов:

– відносний наробіток до відмови АФАР приблизно збігається з відносною кількістю відмов ППК;

– відносне зниження максимальної дальності РЛС приблизно збігається з половинним значенням відносного наробітку до відмови АФАР.

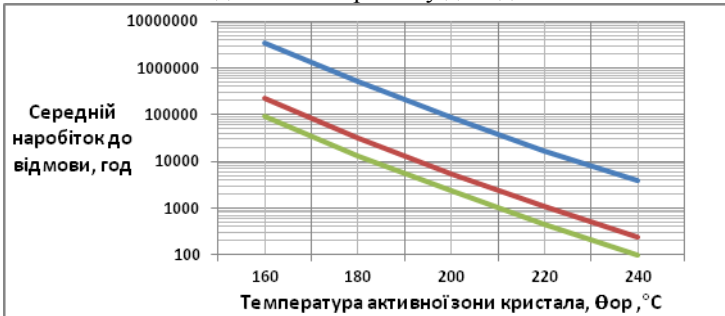


Рисунок 8. Графіки залежності середнього наробітку до відмови ППК (T_{PPK} – крива синього кольору); підрешітки АФАР (– крива червоного кольору) і АФАР в цілому (T_{AFAR} – крива зеленого кольору) від температури активної зони кристала GaN мікромодулів (Θ_{op} , °C)

Оцінка показників надійності АФАР для різних значень температури активної зони кристала GaN мікромодулів випромінюючих ППК дозволяє вибрати оптимальну структуру системи рідинного охолодження і параметрів РЛС з АФАР.

Четвертий розділ присвячено практичним рекомендаціям щодо розрахунку надійності радіоелектронних систем з АФАР та визначенню вимог до надійності НВЧ модулів АФАР.

Розрахунок надійності радіоелектронної системи у загальному випадку представляє собою: процедуру послідовного поетапного уточнення оцінок показників надійності по мірі відпрацювання конструкції та технології виготовлення системи; алгоритмів її функціонування; правил експлуатування; технічного обслуговування; ремонтування; критеріїв відмов; граничних станів; накопичення більш повної та достовірної інформації про всі фактори, які визначають надійність та використання більш адекватних та точних методів розрахунку та розрахункових моделей. Під час розрахунку надійності конкретних систем можливо одночасне застосування різноманітних методів, наприклад, методів прогнозування надійності електронних та електротехнічних елементів з послідовним використанням отриманих результатів у якості вихідних даних для розрахунку надійності системи в цілому або його складових частин різними структурними методами.

Удосконалений метод визначення вимог до показників надійності каналів і модулів АФАР

Основним найбільш масовим і ненадійним типом модулів антенної решітки, що визначає надійність АФАР, є антенний приймально-передавальний модуль (АППМ), який конструктивно включає до свого

складу кілька прийнятно-передавальних каналів (ППК). Якщо вимоги до середнього наробітку до відмови ППК прирівняти до одиниці, то вимоги до середнього наробітку до відмови прийнятно-передавального модулів підрешітки (ППМП) і модулів вторинного живлення (МВЖ) повинні бути в десять раз менш жорсткі, тобто вимоги необхідно прирівнювати, відповідно, до 0,1: $T_{0_ППК} = 0,10 T_{0_ППМП} = 0,10 T_{0_МВЖ}$.

Розроблені вимоги до середнього наробітку до відмови ППК за критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС під час раптових відмов модулів (експоненціальний розподіл).

Якщо допустиме зниження максимальної дальності РЛС дорівнює 0,1 – $(\Delta D/D0)_{\text{доп.}} = 0,1$, то з урахуванням основного рівняння радіолокації для допустимої відносної кількості відмов ППК маємо:

$$\frac{m_G}{G_0} = \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)_{\text{доп.}} \approx 2(\Delta D / D_0)_{\text{доп.}} = 0,20. \quad (21)$$

Тоді за значеннями $\frac{T_{0_ППК}}{T_{0_ППМП}} = 0,10$; $\frac{2T_{0_ППК}}{T_{0_МВЖ}} = 0,20$, для $N_0 = G_0 S_0 = 6400$

ППК з формули (15) для відносного середнього наробітку до відмови АФАР маємо:

$$\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ППК}} = - \frac{\ln \left(1 - 0,20 - \frac{1}{6400} \right)}{1 + 0,10 + 0,20} = 0,172. \quad (22)$$

Тобто, для забезпечення допустимого зниження максимальної дальності не більше ніж 10 % вимоги до середнього наробітку до відмови ППК мають бути не менше значення, що дорівнює:

$$\left(T_{0_ППК} \right)_{\text{вим.}} = \frac{\left(T_{0_АФАР} \right)_{\text{вим.}}}{0,172} = 5,82 \left(T_{0_АФАР} \right)_{\text{вим.}} \quad (23)$$

Для композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів (при 50 % раптових і поступових відмов ППК), вимоги до середнього наробітку до відмови ППК повинні бути в два рази менші, тобто мати значення:

$$\left(T_{0_ППК} \right)_{\text{вим.}} = 2,91 \left(T_{0_АФАР} \right)_{\text{вим.}} \quad (24)$$

Розроблені практичні рекомендації щодо розрахунку надійності дозволяють розробляти в процесі проектування радіоелектронної системи з АФАР з високими показниками надійності і ефективності.

Удосконалення методу визначення вимог до показників надійності ППК АФАР дозволяє зменшити витрати на виготовлення і поставку ППК під час розробки РЛС з АФАР на 20–30 % за рахунок зниження вимог до середнього наробітку до відмови ППК.

ВИСНОВКИ

Вирішено актуальне науково-прикладне завдання, яке полягає у розробленні математичних моделей оцінки надійності радіоелектронних

систем з АФАР, що дозволило визначити нові підходи до проектування радіоелектронних систем.

1. Вперше розроблені математичний метод та моделі апроксимації інтенсивностей раптових і поступових відмов радіоелектронних систем, які відрізняються від існуючих впровадженням експоненціального, Вейбулла і дифузійного немонотонного розподілів та композиції розподілів відмов і можуть бути використані у процесі проектування та розробки каналів і модулів антенної решітки радіоелектронних систем.

2. Вперше розроблені математичні моделі оцінки надійності АФАР з одно рівнявою та дворівневою структурними схемами надійності, які дозволяють визначити оцінку надійності АФАР у процесі проектування радіоелектронних систем.

3. Вперше розроблені та досліджені моделі оцінки надійності АФАР радіоелектронних систем за різними розподілами відмов ППК, що характеризують прояв раптових і поступових відмов. Значення середнього наробітку до відмови АФАР (при 50 % раптових і 50 % поступових відмов ППК) в два рази перевищує його значення при раптових відмовах ППК. Значення середнього наробітку до відмови АФАР під час поступових відмов ППК в сім – вісім разів перевищує його значення під час раптових відмов ППК. Дослідження показали, що використання композиції розподілів для відмов ППК при розрахунку середнього наробітку до відмови АФАР дозволяє отримати вигреш у розмірі 40–90 % в порівнянні з використанням експоненціального розподілу відмов.

4. Вперше розроблений метод та математична модель оцінки надійності АФАР радіоелектронних систем в залежності від температури активної зони кристалів GaN (нітриду галію) мікромодулів, що дозволяють вибрати оптимальну структуру системи рідинного охолодження.

5. Вдосконалені і досліджені показники надійності активних фазованих антенних решіток радіоелектронних систем з 10 % і 20 % надмірністю для елементів розподільної структури, які характеризується довільними підрозділами відмов.

6. Вдосконалений та дістав подальшого розвитку метод визначення вимог до показників надійності приймально-передавальних каналів АФАР РЛС з урахуванням критерію допустимого зниження максимальної дальності РЛС, що дозволяє зменшити витрати на виготовлення і поставку ППК під час розробки РЛС з АФАР на 10–20 % за рахунок зниження вимог до середнього наробітку до відмову ППК.

СПИСОК ОПУБЛІКУВАННЯ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. Kostanovsky V., Kozachyk O., Rusniak I. Development of the algorithm of reliability centered maintenance of phased array antennas. *Eastern-European*

journal of enterprise technologies. 2018. 1/9. P. 32–38. (Журнал включено до НМБД **SCOPUS**)

2. Kostanovskiy V., Machalin I., Kozachuk O., Terentyeva I. Construction of ageneralized probabilistic – physical model of reliability of two-level active a phased antenna array. *Eastern - Europe anjournal of enterprise technologies*. 2019. 3/9 (99). P. 31–40. (Журнал включено до НМБД **SCOPUS**)

3. Козачук О. Д. Дослідження впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності резервованих систем з дробовою кратністю. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем, НАН України «Математичні машини і системи»*. 2015 р. №1. С. 171–177.

4. Костановський В. В., Козачук О. Д. Математичні моделі прогнозування показників безвідмовності та довговічності електрорадіовиробів на основі статистичних даних про відмови. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем. НАН України «Математичні машини і системи»*. 2015. №2. С. 157–169.

5. Костановский В. В., Козачук О. Д. Вероятностный анализ безотказности и долговечности апертур фазированных антенных решеток в процессе проектирования, *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем НАН України «Математичні машини і системи»*, 2015, № 3, С. 201–212.

6. Kostanovsky V., Kozachuk O. Prospects for probabilistic – physical analysis of reliability in the design of radio-electronic systems. *National aviation university electronics and control systems* НАУ. 2017. № 1 (51). С. 59–67.

7. Костановский В.В., Козачук О.Д. Оптимизация технического обслуживания группы фазированных антенных решеток с учетом внезапных и постепенных отказов СВЧ каналов. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем, НАН України «Математичні машини і системи»*. 2017. № 1. С. 122–130.

8. Костановський В. В., Козачук О. Д. Метод ідентифікації параметрів універсальної моделі відмов, яка апроксимує криву інтенсивності відмов виробів електронної техніки. *Науковий журнал «Наукоємні технології» НАУ*. 2018. № 4 (40). С. 465–472.

9. Костановський В. В., Демченко О. В., Козачук О. Д., Мачалін І. О. Модель розрахунку показників надійності АФАР за критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС. *Науковий журнал «Наукоємні технології» НАУ*. 2020. № 1. С. 1–10.

10. Костановський В. В., Козачук О. Д., Мачалін І. О. Математична модель надійності приймально-передавальної АФАР у приймальному режимі за критерієм допустимого погіршення рівня бокових пелюсток. *Науковий журнал «Наукоємні технології» НАУ*. 2020. № 3. С. 276–286.

11. Костановський В. В., Мачалін І. О., Козачук О. Д. Взаємозв'язок стратегій експлуатації та технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій. *Науковий журнал «Радіотехніка»*.

2020. № 4.

12. Козачук О. Д., Костановський В. В., Мачалін І. О., Терентьєва І. Є. Розробка методу та визначення вимог до показників надійності каналів і модулів активної фазованої антенної решітки. *Науковий журнал «Наукоємні технології» НАУ*. 2020. № 4 (48). С. 439–442.

Матеріали конференцій

13. Костановський В. В., Козачук О. Д. Оценка показателей безотказности и долговечности электрорадиоэлементов по результатам испытаний на надежность. Характеристика показателей надежности современной элементной базы, используемой при разработке корабельных радиоэлектронных систем – *Тези доповіді на науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», 16–17 грудня 2010 року, ЦНДІ ОБТ ЗСУ, м. Київ*. С. 153–154.

14. Козачук О. Д., Костановський В. В. Особенности расчета показателей надежности электрорадиоэлементов стран ближнего и дальнего зарубежья изделий военной и гражданской радиоэлектроники – *Тези доповіді на науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», 16–17 грудня 2010 року, ЦНДІ ОБТ ЗСУ, м. Київ*. С. 228–229.

15. Костановський В. В., Козачук О. Д. Оцінка середнього та залишкового ресурсу корабельних радіоелектронних комплексів ракетно-артилерійського озброєння при дифузійному немонотонному розподілі наробітку до відмови – *Тези доповідей II наукової конференції «Проблеми експлуатації і розвитку ракетно-артилерійського озброєння військово-морських сил України», 5–7 жовтня 2011 року. Севастополь, Академія Військово-Морських Сил імені П. С. Нахімова*. С. 39–41.

16. Козачук О. Д., Костановський В. В. Коротке аналізування методів розрахунку надійності оптоелектронної елементної бази, що представлені в зарубіжних довідниках щодо надійності – *Збірник тез доповідей XII міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», НТУ «Київський політехнічний інститут». Приладобудівний факультет, 23–24 квітня 2013. м. Київ, Україна*. С. 63–64.

17. Козачук О. Д., Костановський В. В. Особенности применения зарубежных справочников при оценке надежности электрорадиоэлементов в процессе разработки авиационной радиоэлектронной аппаратуры – *Матеріали Міжнародної наукової конференції 16–17 жовтня 2013 року «Статистичні методи обробки сигналів і даних» – НАУ. Інститут аеронавігації, 2013*. С. 128–131.

18. Козачук О. Д. Оценка надежности импортной элементной базы в процессе разработки авиационной радиоэлектронной аппаратуры НАУ – *«Проблеми навігації і управління рухом» Всеукр. наук.-практ. конф., 18–20 листопада 2013 р.: тези доп. НАУ*. 2013. С. 103.

19. Козачук О. Д. Исследование надежности систем с общим нагруженным резервированием с дробной кратностью при различных законах распределения времени безотказной работы элементов, учитывающих внезапные и постепенные отказы, *НАУ. «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM, Наук.-техн. конф., 17–19 листопада 2014. Тези доп. м. Київ. 2014. С. 64.*

АНОТАЦІЯ

Козачук О. Д. Математичні моделі оцінки надійності радіоелектронних систем – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту». – Національний авіаційний університет, МОН України, Київ, 2021.

Робота присвячена розвитку математичних моделей оцінки надійності радіоелектронних систем (РС) з активними фазованими антенними решітками (АФАР). У роботі розроблений комплекс математичних моделей апроксимації кривих інтенсивностей відмов електрорадіовиробів імовірнісними розподілами, що описують раптові і поступові відмови.

Досліджено вплив коефіцієнта надмірності РС з розподіленою структурою при різних імовірнісних розподілах відмов вузлів, каналів і модулів. Побудовані та досліджені моделі оцінки надійності РС з АФАР при раптових і поступових відмовах каналів і модулів. Аналіз впливу поступових відмов модулів антенних решіток під час оцінки надійності РС дозволяє підвищити оцінку середнього наробітку до відмови АФАР від 30% до 80%. Розроблено та досліджено математичну модель оцінки надійності АФАР РС в залежності від температури активної зони кристалів GaN (нітриду галію) мікромодулів, що дозволяє вибрати оптимальну структуру системи рідинного охолодження.

Ключові слова: математичні моделі, радіоелектронна система, активна фазована антенна решітка, оцінка надійності, імовірнісні розподіли відмов, середній наробіток до відмови, інтенсивність відмов

АННОТАЦИЯ

Козачук О. Д. Математические модели оценки надежности радиоэлектронных систем – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 «Эксплуатация и ремонт средств транспорта». – Национальный авиационный университет, МОН Украины, Киев, 2021.

Работа посвящена развитию математических моделей оценки надежности радиоэлектронных систем (РС) с активными фазированными антенными решетками (АФАР). В работе разработан комплекс математических моделей аппроксимации кривых интенсивностей отказов электрорадиоизделий вероятностными распределениями, описывающих

внезапные и постепенные отказы. Исследовано влияние коэффициента избыточности РС с распределенной структурой при различных вероятностных распределениях отказов узлов, каналов и модулей. Построены и исследованы модели оценки надежности РС с АФАР при внезапных и постепенных отказах каналов и модулей. Учет влияния постепенных отказов модулей антенных решеток при оценке надежности РС позволяет повысить оценку средней наработки до отказа АФАР от 30 % до 80 %.

Разработана и исследована математическая модель оценки надежности АФАР РС в зависимости от температуры активной зоны кристаллов GaN микромодулей, что позволяет выбирать оптимальную структуру системы жидкостного охлаждения.

Ключевые слова: математические модели, радиоэлектронная система, активная фазированная антенная решетка, оценка надежности, вероятностные распределения отказов, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов.

ANNOTATION

Kozachuk O. D. Mathematical models for assessing the reliability of radio electronic systems – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.22.20 "Operation and repair of vehicles". – National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The work is devoted to the development of mathematical models for assessing the reliability of radio electronic systems (RS) with active phased antenna arrays (APAA). The work developed a complex of mathematical models for approximating the curves of failure rates of electrical radio products by probability distributions describing sudden and gradual failures. The influence of the redundancy factor of a distributed structure with different probabilistic distributions of failures of nodes, channels and modules is investigated. Models for assessing the reliability of RS with APAA in case of sudden and gradual failures of channels and modules have been built and investigated. Taking into account the effect of gradual failures of antenna array modules in assessing the reliability of the RS allows to increase the estimate of the average operating time before the APAA failure from 30 % to 80 %. A mathematical model has been developed and investigated for assessing the reliability of the APAA RS depending on the temperature of the core of *GaN* (gallium nitride) crystals of micro modules, which makes it possible to choose the optimal structure of the liquid cooling system.

Key words: mathematical models, electronic system, active phased array antenna, reliability assessment, probability distributions of failures, mean time to failure, failure rate.

Підп. до друку 01.04.2021. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,39. Обл.-вид. арк. 1,5.
Тираж 100 пр. Замовлення № 58-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Любомира Гузара, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002