

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Костановський Валерій Вікторович**



УДК 623.6-523.8:623.4.017

**МЕТОДОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ  
ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ  
АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК  
РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ**

Спеціальність 05.22.20 –  
Експлуатація та ремонт засобів транспорту

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертація є рукопис.

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

- Науковий консультант      доктор технічних наук, професор  
**Мачалін Ігор Олексійович**,  
Національний авіаційний університет (м. Київ),  
професор кафедри телекомунікаційних  
та радіотехнічних систем.
- Офіційні опоненти:      доктор технічних наук, професор  
**Петрашевський Олег Львович**,  
Національний транспортний університет (м. Київ),  
професор кафедри, професор;
- доктор технічних наук, професор  
**Машков Олег Альбертович**,  
Державна екологічна академія післядипломної  
освіти та управління Міністерства енергетики  
та захисту довкілля (м. Київ),  
проректор з наукової роботи;
- доктор технічних наук, професор  
**Богом'я Володимир Іванович**,  
Державний університет інфраструктури  
та технологій (м. Київ),  
професор кафедри технічних система  
процесів управління в судноводінні.

Захист відбудеться « 13 » травня 2021 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради – Д 26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, корп. 1, ауд. 1.001.

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.** У цей час провідні країни світу широко використовують радіолокаційні станції (РЛС) з фазованими антенними решітками (ФАР) для потреб цивільної авіації, створення засобів протиракетної оборони (ПРО) і захисту повітряного простору. Особливу роль у сучасній радіоелектроніці грають фазовані антенні решітки (ФАР), технології створення яких за останні 20–25 років розвиваються найбільш інтенсивно. Їх застосування дозволило збільшити швидкість огляду простору, поліпшити характеристики антенних систем, забезпечити можливість багатофункціональної роботи РЛС різного призначення. Створення надійних радіолокаційних засобів з ФАР, які забезпечували б збройним силам можливість безперервного та оперативного збору повних і достовірних даних про стан, а також високоточне визначення координат і пріоритетним завданням військово-технічної політики. З огляду на розширення обсягу вирішуваних завдань створюються якісно нові системи наступного покоління, розвиваються технології РЛС з активними ФАР (АФАР).

Безперервне зростання складності пасивних і активних ФАР наземних і корабельних РЛС: розширення функцій, що виконуються ними привели до того, що для розробки, виготовлення і експлуатації нових РЛС з АФАР компанії розробники та виробники змушені витратити величезні кошти в обсязі десятків і сотень мільйонів доларів. При цьому значні кошти вкладаються компаніями в розробку нових надійних НВЧ-приладів на основі арсеніду і нітриду галію і підвищенню надійності АФАР в цілому.

Основні фірми і компанії розробники РЛС з ФАР в США: компанія «Raytheon» – розробник сімейства корабельних РЛС AN/SPY-1 і AN/SPY-6 для БСКЗ «Іджіс», наземної ЗРК «Patriot» (P-1, P-3), наземної системи ТНААД та ін.; «Нортроп-Грумман» – розробник наземної системи G/ATOR та ін.; «Локхід-Мартін» – розробник наземної системи ТНААД та ін.

Основні організації розробники РЛС в Росії: концерн «Алмаз-Антей» – розробник систем С-300, С-400; ВНДІ РЕ (ВНДІ «Альтаір») – розробник корабельної РЛС С-300Ф «Форт»; ФГУП «ВНДІ РТ» - розробник РЛС ЗРК «Панцир С1», «Редут», «Фурке», С-350.

Основні організації розробники РЛС в Україні: ДП «НДІ «Квант-Радіолокація» (м. Київ) – розробник морських РЛС «Позитив – МЕ1», «Позитив – МЕ2»; КП НВК «Іскра» (м. Запоріжжя) (розробник наземних РЛС 80К6Т (80К6К1, 80К6М); ДП «НДІ «Квант» (м. Київ) – розробник корабельної РЛС «Марс-Пассат» та морської РЛС «Фенікс-У».

**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 математичних моделей надійності, експлуатації і технічного обслуговування РЛС з АФАР. Здобувач, починаючи з 1976 р., брав активну участь у всіх розробках ДП «НДІ «Квант» і ДП «НДІ «Квант-Радіолокація» як фахівець з розрахунку

надійності складних систем в тому числі: технічному проекті РЛС «Фенікс»; концептуальних проектах «Пересувного радіолокаційного посту багатофункціональної станції супроводу і наведення малої та середньої дальності зенітного ракетного комплексу»; ескізних проектах «Пересувного радіолокаційного посту багатофункціональної станції супроводу і наведення малої та середньої дальності зенітного ракетного комплексу».

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є: розробка та дослідження моделей експлуатаційної надійності і методів підвищення ефективності технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій.

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

- визначити критерії відмов РЛС з АФАР;
- розробити метод побудови математичних моделей надійності АФАР РЛС з використанням методів теорії ізотропних ієрархічних систем;
- розробити та досліджувати математичні моделі надійності передавальної, приймальної і приймально-передавальної АФАР РЛС;
- вибрати показники ефективності технічного обслуговування та розробити математичні моделі оптимізації ТО АФАР для використання в період гарантійного обслуговування;
- розробити стратегії експлуатації і ТО за фактичним станом та методи реалізації даних стратегій в період післягарантійного обслуговування АФАР РЛС;
- розробити метод визначення кількості запасних вузлів і модулів для забезпечення експлуатації та ТО АФАР за наробітком і фактичним станом.

*Об'єкт дослідження* – процес технічного обслуговування активної фазованої антенної решітки радіолокаційної станції.

*Предмет дослідження* – методологія підвищення ефективності технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій.

**Методи дослідження** базуються на апарати теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії надійності, теорії випадкових процесів, теорії масового обслуговування, теорії ізотропних ієрархічних систем, теорії математичного моделювання та оптимізації, теорії нечітких множин та теорії управління запасами.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вирішена наукова проблема розроблення методології підвищення ефективності технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій, що дозволило визначити нові підходи до їх технічного обслуговування в сучасних умовах.

*Вперше:*

- визначені критерії відмов та розроблений метод побудови математичних моделей надійності АФАР зі структурною схемою будь-якого  $k$  – рівня складності які на відміну від відомих використовують теорію ізотропних ієрархічних систем;
- розроблені математичні моделі надійності АФАР, що не обслуговуються, зі структурною схемою надійності  $k$  – рівня складності за критерієм допустимого зниження рівня працездатних випромінювачі НВЧ

каналів антенної решітки які можуть використовуватися під час проектування передавальних і приймально-передавальних РЛС та виконана перевірка на адекватність розробленої моделі надійності АФАР;

– розроблені математичні моделі надійності АФАР, що не обслуговуються, за критерієм допустимого зменшення максимальної дальності радіолокатора яка може використовуватися під час проектування передавальних та приймально-передавальних РЛС;

– розроблені математичні моделі надійності АФАР, що не обслуговуються, за критерієм допустимого погіршення рівня бокових пелюсткові для аналогової і аналого-цифрової АФАР які можуть використовуватися під час проектування приймальних і приймально-передавальних РЛС;

– розроблені математичні моделі надійності АФАР, що обслуговуються, які можуть використовуватися при експлуатації і ТО великих РЛС з постійним обслуговуючим персоналом, що можуть дозволити персоналу великих РЛС збудувати ефективні плани технічного обслуговування АФАР;

– розроблені метод і математичні моделі оптимізації технічного обслуговування одно рівнявою, дворівневою АФАР та групи АФАР, що дозволяє отримати значний вигаш від оптимізації за критерієм мінімуму математичного очікування питомих експлуатаційних витрат;

– розроблені методи реалізації стратегії експлуатації і ТО АФАР РЛС. Розроблена структурна схема взаємозв'язку стратегій експлуатації та ТО АФАР. Використання запропонованих методів при реалізації стратегій експлуатації та ТО дозволить отримати значну економію експлуатаційних витрат на етапі післягарантійного обслуговування АФАР РЛС, за рахунок прогнозування відмов каналів і модулів АФАР і своєчасного виконання.

*Удосконалені та досліджені* математичні моделі надійності типових структур АФАР, що не обслуговуються, за різними розподілами відмов приймально-передавальних каналів, які враховують раптові і поступові відмови каналів. Це дозволило значно збільшити оцінку середнього наробітку до відмови АФАР, що не обслуговується.

*Доопрацьовано та дістав подальшого розвитку* метод визначення необхідної кількості запасних частин для забезпечення призначеного ресурсу і строку служби АФАР в частині обліку різних законів розподілу відмов каналів і модулів АФАР який дозволив отримати значну економію експлуатаційних витрат на придбання потрібної кількості запасних частин.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень.** Підтверджується коректним використанням сучасного математичного апарату, використанням наукових положень теорії надійності і експлуатації технічних систем, погодженням отриманих теоретичних результатів з експериментальними і експлуатаційними даними.

**Практичне значення отриманих результатів.** Теоретичні результати, отримані в дисертації, дозволяють комплексно вирішувати проблему розроблення методології підвищення ефективності ТО АФАР РЛС. Розроблені математичні моделі і методи створюють основу та нові можливості для визначення показників експлуатаційної надійності та стратегій технічного обслуговування АФАР за фактичним станом. При цьому, отримані результати дозволяють:

– побудувати математичні моделі і визначити показники надійності приймальної, передавальної і приймально-передавальної АФАР РЛС на етапах ескізного, технічного та робочого проектування;

– вибирати оптимальне технічне обслуговування (коригувальну заміну каналів і модулів) для АФАР РЛС на період гарантійного обслуговування;

– реалізувати стратегії експлуатації і технічного обслуговування АФАР РЛС за фактичним станом на період післягарантійного обслуговування;

– забезпечити весь термін служби АФАР потрібної кількістю запасних каналів і модулів.

#### **Практична цінність роботи відображена в наступних матеріалах:**

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

– в концептуальному проекті «Пересувного радіолокаційного посту багатофункціональної станції супроводу і наведення малої дальності зенітного ракетного комплексу» – розрахунки показників надійності АФАР і МССН ЗРК, децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р. Замовник: КБ «Південне»;

– в концептуальному проекті «Пересувного радіолокаційного посту багатофункціональної станції супроводу і наведення середньої дальності зенітного ракетного комплексу» – розрахунки показників надійності АФАР і МССН ЗРК, децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р. Замовник: КБ «Південне»;

– в ескізному проекті «Пересувного радіолокаційного посту багатофункціональної станції супроводу і наведення малої дальності зенітного ракетного комплексу» – розрахунки показників надійності АФАР і МССН ЗРК, децимальний номер: ZRS RVN ANL 001 06 2017 р. Замовник: КБ «Південне»;

– в ескізному проекті «Пересувного радіолокаційного посту багатофункціональної станції супроводу і наведення середньої дальності зенітного ракетного комплексу» – розрахунки показників надійності АФАР і МССН ЗРК, децимальний номер: ZRS RVN ANL 001 07 2017 р. Замовник: КБ «Південне».

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

#### **Особистий внесок здобувача**

Основні результати роботи отримано здобувачем самостійно і опубліковано в 40 наукових працях. Роботи [1, 5, 6, 7, 13, 14, 18, 23, 28, 31, 32, 33, 34, 35] виконані самостійно. 3 робіт, що опубліковані у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належить:

– у роботі [2] – розроблені метод, стратегія і алгоритм технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій за фактичним станом; у роботі [3] – розроблені програми розрахунку показників надійності активних фазованих антенних решіток з

однорівневою і дворівневою структурною схемою надійності; у роботі [8] – проведено аналіз статистичних даних по надійності в довідниках по надійності електрорадіовиробів; у роботі [9] – представлений і досліджений метод імовірнісного аналізу електронних модулів і активних фазованих антенних решіток; у роботі [4] – розглянуті переваги використання дифузійного немонотонного розподілу відмов електронних елементів в порівнянні з експоненціальним розподілом; у роботі [11] – отримані аналітичні вирази для визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування групи активних фазованих антенних решіток, розміщених в антенному посту; у роботі [12] – розроблені програми для розрахунку моделей апроксимації кривих інтенсивностей відмов електрорадіовиробів дифузійним немонотонним розподілом і композицією розподілів; у роботі [15] – отримані аналітичні вирази для середнього наробітку до відмови і інтенсивності відмов активної фазованої антенної решітки за критерієм допустимого зниження максимальної дальності радіолокаційної станції; у роботі [16] – розроблена і досліджена математична модель надійності активних фазованих антенних решіток за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток; у роботі [17] – визначені критерії відмов і розроблені математичні моделі надійності активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій з  $k$  – рівнем структурною схемою надійності; у роботі [19] – складена класифікація та визначені стратегії технічного обслуговування і експлуатації з наробітку та фактичним станом активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій; у роботі [20] – розроблені програми для визначення вимог до показників надійності каналів і модулів активної фазованої антенної решітки; у роботі [21] – визначені методи чисельного рішення системи з чотирьох нелінійних рівнянь при контролі процесу плавки металу методами багатоколірної тонометрії; у роботі [22] – розроблені програми для чисельного рішення системи з чотирьох нелінійних рівнянь при контролі процесу плавки металу методами багатоколірної тонометрії; у роботі [23] – розроблені програми відпрацювання показників надійності у процесі створення артилерійського озброєння на прикладі 30 мм гармати; у роботі [24] – представлені оцінки показників безвідмовності і довговічності сучасних електрорадіоелементів за результатами випробувань на надійність; у роботі [25] – представлені особливості методів розрахунку показників надійності електрорадіоелементів країн ближнього і далекого зарубіжжя виробів військової і цивільної радіоелектроніки; у роботі [26] – представлені оцінки середнього та залишкового ресурсу корабельних радіоелектронних комплексів при дифузійному немонотонному розподілі наробітку до відмови; у роботі [27] – представлено короткий аналіз методів розрахунку надійності оптоелектронної елементної бази, що представлена у зарубіжних довідниках щодо надійності; у роботі [29] – проведено короткий аналіз моделей розрахунку надійності у зарубіжних довідниках при оцінці надійності електрорадіоелементів в процесі розробки авіаційної радіоелектронної апаратури; у роботі [5] – сформульована та доказана

теорема 2, затвердження якої складають теоретичні основи векторної бази діагностики; у роботі [35] – виконані розрахунки надійності і показників технічного обслуговування РЛС «Фенікс» з АФАР та розрахунки необхідної кількості запасних приймально-передавальних модулів; у роботі [36] – виконані розрахунки надійності і показників технічного обслуговування РЛС з АФАР для ПРП БССН МД ЗРК та розрахунки необхідної кількості запасних приймально-передавальних модулів; у роботі [37] – виконані розрахунки надійності і показників технічного обслуговування РЛС з АФАР для ПРП БССН СД ЗРК та розрахунки необхідної кількості запасних приймально-передавальних модулів; у роботі [38] – виконані розрахунки надійності і показників технічного обслуговування РЛС з АФАР для ПРП БССН МД ЗРК та розрахунки необхідної кількості запасних приймально-передавальних модулів; у роботі [39] – виконані розрахунки надійності і показників технічного обслуговування РЛС з АФАР для ПРП БССН СД ЗРК та розрахунки необхідної кількості запасних приймально-передавальних модулів.

#### **Апробація матеріалів дисертації**

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та ухвалені на таких конференціях: Науково-технічної конференції «Проблеми питання розвитку озброєння та військової техніки» у 2010 р. у м. Київ; 3-ої Міжнародної конференції «Артилерійські ствольні системи, боєприпаси, засоби артилерійської розвідки та керування вогнем» у 1999 р. у м. Київ; XII міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан и перспективи» у 2013 р. у м. Київ; Науково-технічної конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку навігації, спостереження та організації повітряного руху GNS/ATM» у 2014 г. у м. Київ; II наукової конференції «Проблеми експлуатації і розвитку ракетно-артилерійського озброєння військово-морських сил України» у 2011 року у м. Севастополь; Міжнародної наукової конференції «Статистичні методи обробки сигналів і даних» у 2013 р. у м. Київ.

**Публікації.** Основні наукові результати дисертації опубліковані у 40 наукових праць, у тому числі: 23 статтях, серед яких 3 статті опубліковано у журналах, що входять до наукометричної бази даних Scopus, 1 стаття в журналі, що входить до наукометричної бази даних Index Copernicus, 20 статей у виданнях, що внесені до переліку наукових фахових видань України; 8 роботах у збірниках матеріалів і праць наукових конференцій; 4 стандартах підприємства; 5 пояснювальних записках до концептуального, ескізного і технічного проектів РЛС з АФАР.

#### **Обсяг і структура дисертації**

Дисертаційна робота викладена на 329 сторінках машинописного тексту, складається з вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 271 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 42 таблицями, 62 рисунками. Список використаних джерел містить 237 найменувань, з них 209 кирилицею та 28 латиницею.



## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проведено короткий аналіз методів підвищення надійності та ефективності технічного обслуговування пасивних і активних ФАР радіолокаційних станцій.

У світі розвитком радіолокаційної тематики займаються багато тисяч учених, інженерів і техніків. Спеціалісти по радіолокації США і західних країн об'єднані в Міжнародну некомерційну асоціацію фахівців в області техніки (IEEE). IEEE будучи світовим лідером в області розробки стандартів з радіоелектроніки, електротехніки та апаратного забезпечення обчислювальних систем і мереж, щорічно проводить Міжнародні конференції IEEE «Фазировані антенні системи і технології» (IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology). Найбільш відомими американськими вченими в області радіолокації є члени IEEE проф. Eli Brookner, Ashok A. Agrawal, Makoto Ando, Ken Brown, John Huang, Eric Holzman, Bruce A. Kopp, Mark H. Luesse, Kenneth W. O'Haver та інші.

Найбільш відомими російськими вченими в області радіолокації є Олександр Леманський (генеральний конструктор систем сімейства С-300 і С-400) і Вадим Корляков (генеральний директор ВАТ «Всеросійський НДІ «Радіотехніки») та інші. Найбільш відомими українськими вченими в галузі радіолокації є кандидати технічних наук Гузь В. І., Бутирін А. В., Ліпатов В. П., Демченко О. В., Красуцький О. О. (м. Київ), інженери Піза Д. М., Семенов Д. С, Бугрова Т. І. (м. Запоріжжя) та інші.

Проведений аналіз показників надійності і елементної бази низки країн діючих багатофункціональних РЛС з АФАР, що спроектовані, а саме у США, ФРН, Росії, КНР, Італії та України. Проведений аналіз показників надійності діючих РЛС з ФАР провідних країн світу – США, ФРН, Росії, КНР, Італії та України показав, що з 1980 року до 2010 року:

- середній наробіток до відмови НВЧ-підсилювачів РЛС з ФАР зріс в 200 разів – від 500 год. до 100.000 год;
- середній наробіток до відмови РЛС з ФАР зріс у 10–30 разів – від 100 год. до 1000 год ÷ 3000 год.

Аналіз робіт, який присвячений відмовам модулів активних АФАР показав, що основний причиною відмов НВЧ модулів є вплив на їх структуру потужних енерго – і термоциклів, що призводить до розвитку і накопиченню руйнувань на кордоні матеріалів з різним тепловим коефіцієнтом розширення. Залежність накопленого відсотка відмов НВЧ модулів від числа термоциклів  $N$  добре описується розподілом Вейбулла. Виходячи з вище викладеного випливає, що для розрахунку надійності каналів і модулів АФАР РЛС необхідно враховувати не тільки раптові відмови модулів, але і їх спільний прояв раптових і поступових відмов. Проведений аналіз відмов міцних транзисторів каналів і модулів АФАР показав, що для них характерний прояв не тільки раптових, але і поступових відмов (приблизно 50 % на 50 %). Тому відмови прийнятно-передавальних каналів і джерел вторинного електроживлення повинні описуватися

композицією експоненціального розподілу (раптові відмови) і одним із законів розподілу, що визначають поступові відмови (дифузійний немонотонний розподіл, розподіл Вейбулла, нормальний розподіл).

Теоретичні питання експлуатації і ТО складних систем розглядалися вченими останні 70 років. В різні часи значний внесок у розвиток і вирішення проблеми підвищення ефективності експлуатації і технічного обслуговування складних систем та розробки математичних моделей і методів зробили вчені: Барзилович В. А., Бикадоров А. К., Беляев Ю. К., Богомья В. І., Гнеденко Б. В., Герцбах І. Б., Гриб Д. А., Дружинин Г. В., Дедков В. К., Ігнатов В. О., Іщкович А. А., Конахович Г. Ф., Креденцер Б. П., Кульбак Л. Н., Коваленко І. Н., Каштанов А. В., Королук В. С., Кузнецов В. Н., Кіриллук А. С., Кірилова Н. А., Ленков С. В., Ланецкий Б. Н., Лук'янчук В. В., Мачалін І. О., Машков О. А., Орловський М. Н., Опенько П. В., Петрашевський О. Л., Райкин А. Л., Рябинин І. А., Седякин Н. М., Соловьев А. Д., Стрельников В. П., Соломенцев О. В., Сотськов В. С., Северцев Н. А., Цицарев В. Н., Черкесов Г. Н., Широков О. М., Уланський В. В., Ушаков І. А.

У 1980-х роках підприємствами-розробниками РЛС – ВНПРТ, НДІ «Альтаір» (Москва) і НВО «Квант» (Київ) для розрахунку показників надійності АФАР використовувалася математична модель резервованої невідновлювальної системи з навантаженим ковзаючим резервом. Під критерієм відмови АФАР розумілося зниження відносної кількості працездатних випромінюючих каналів до допустимого значення.

Розробці методів розрахунку надійності АФАР за кордоном присвячено ряд робіт. Американським проф. А. К. Агравалом у 1999 році розглядалась модель розрахунку середнього наробітку до відмови АФАР, яка враховує кількість працездатних каналів та модулів антенної решітки та рівень (амплітуду) бічних пелюсток.

Короткий огляд методів експлуатації РЛС показав, що під час організації експлуатації РЛС розвинених країн заходу використовується регламентний метод ТО і сервісна форма обслуговування фірмами-виробниками при проведенні середніх та капітальних ремонтів РЛС, а також під час ремонту модулів і блоків, що відмовили.

Для України, РФ, Китаю і інших країн колишнього СРСР характерне застосування змішаної форми ТО: регламентна форма при обслуговуванні механічних та електромеханічних вузлів і обслуговування за фактичним станом для радіоелектронної апаратури. Ремонт модулів і вузлів, що відмовили здійснюється особовим складом РЛС або вони направляються для ремонту на завод-виробник.

Виходячи з вищенаведеного можна зробити висновок, що необхідна розробка і вдосконалення моделей, методів і алгоритмів методології підвищення ефективності технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційної станції.

**В другому розділі** розглядається системний аналіз показників надійності електронного модулю АФАР. Під системним аналізом показників надійності електронного пристрою розуміється визначення імовірнісних характеристик надійності електрорадіовиробів, які формують даний пристрій, і визначення ступеня їх впливу на характеристики надійності цього пристрою.

Імовірність безвідмовної роботи (ІБР) електронного модуля визначається як добуток ІБР для всіх  $N$  типоміналів ЕРВ, що входять до складу модуля

$$P_{\text{МОД}}(t) = \prod_{i=1}^N [P_{\text{ЕРВ}_i}(t)]^{n_i}, \quad (1)$$

де  $n_i$  – кількість елементів  $i$ -го типоміналу ЕРВ.

Для проведення системного аналізу надійності електронного модуля використовуються три моделі надійності: експоненціальний розподіл (ЕР) і дві композиції розподілів: композиція експоненціального та розподілу Вейбулла (ЕР  $\times$  ВР) і композиція експоненціального та дифузійного розподілів (ЕР  $\times$  ДНР).

Аналітичні вирази ІБР електрорадіовиробів для зазначених вище розподілів мають вигляд:

– для експоненціального розподілу:

$$P_{\text{ЕРВ\_ЕР}}(t) = \exp(-\lambda_{\text{ЕРВ\_РАПТ}} t), \quad (2)$$

– для композиції експоненціального и Вейбулла розподілів:

$$P_{\text{ЕРВ\_ЕР} \times \text{ВР}}(t) = \exp\left\{-[\lambda_{\text{ЕРВ\_РАПТ}} t] + \left(\frac{b_m t}{T_{0\_WR}}\right)^m\right\}, \quad (3)$$

– для композиції експоненціального и дифузійного немонотонного розподілів:

$$P_{\text{ЕРВ\_ЕР} \times \text{ДНР}}(t) = \exp(-\lambda_{\text{ЕРВ\_РАПТ}} t) \left[ \Phi\left(\frac{T_{0\_DNR} - t}{v\sqrt{T_{0\_DNR} t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0\_DNR} + t}{v\sqrt{T_{0\_DNR} t}}\right) \right], \quad (4)$$

Показниками довговічності електронного модуля є гамма-відсотковий ресурс –  $T_\gamma$ , який визначається з рішення трансцендентного рівняння:

$$\gamma = \prod_{i=1}^N [P_{\text{ЕРВ}_i}(T_\gamma)]^{n_i} \quad (5)$$

Середній наробіток до відмови електронного модуля, який є для модуля також середнім ресурсом, визначається за відомою в теорії надійності формулою:

$$T_{0\_МОД} = \int_0^\infty \prod_{i=1}^N [P_{\text{ЕРВ}_i}(t)]^{n_i} dt \quad (6)$$

Коефіцієнти впливу  $i$ -го ЕРВ на надійність електронного модулю  $KV_i(T_\gamma)$ ,  $i = \overline{1, N}$  знаходяться для моментів часу, відповідних гамма-відсоткового ресурсу модуля за формулою:

$$KV_i(T_\gamma) = \frac{n_i \ln P_{\text{ЕРВ}_i}(T_\gamma)}{\ln P_{\text{ЕР\_МОД}}(T_\gamma)} 100\%, \quad i = \overline{1, N} \quad (7)$$

Для експоненціального закону розподілу коефіцієнти впливу визначаються за формулою:

$$KV_i(T_\gamma) = \frac{n_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^s n_i \lambda_i}, \quad i = \overline{1, N} \quad (8)$$

На рис. 1 представлені імовірності безвідмовної роботи електронного модуля для трьох розподілів: EP, EP×BP і EP×ДНР

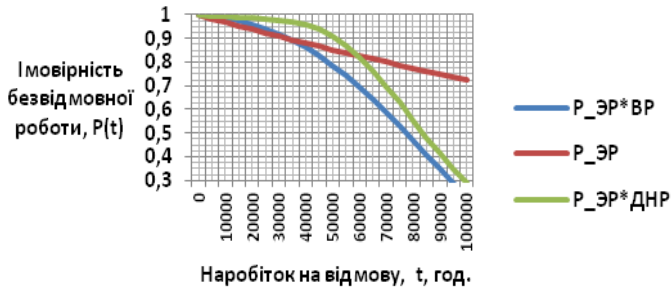


Рисунок 1. Імовірність безвідмовної роботи електронного модуля при різних розподілах наробітку EPB: експоненціальному – EP; композиції розподілів: експоненціального і Вейбулла – EP×BP; композиції розподілів: експоненціального і дифузійного немонотонного – EP×ДНР

У табл. 1 представлені результати розрахунку гамма-відсоткового ресурсу електронного модуля для трьох розподілів: EP, EP×BP і EP×ДНР.

Таблиця 1

**Результати розрахунку гамма-відсоткового ресурсу електронного модуля для трьох розподілів: EP, EP×BP і EP×ДНР**

Імовірність EPB	Гамма-відсотковий ресурс $T_\gamma$			
	$\gamma = 0,99$	$\gamma = 0,98$	$\gamma = 0,95$	$\gamma = 0,90$
	3747	7532	19125	39284
	7664	12628	22431	32919
	14407	27857	43508	53274

Найбільш перспективною математичною моделлю для апроксимації імовірності безвідмовної роботи EPB при системному аналізі надійності електронних модулів є композиція експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів (модель EP×ДНР).

У третьому розділі представлено характеристика прийнятно-передавальної АФАР РЛС, яка досліджується у дисертаційній роботі. Визначені критерії ефективності та критерії відмов, розроблений метод побудови математичних моделей надійності АФАР РЛС, розроблені та

досліджені математичні моделі надійності приймально-передавальних АФАР що не обслуговуються:

- за критерієм допустимого зменшення кількості працездатних приймально-передавальних каналів;
- за критерієм допустимого зниження рівня максимальної дальності радіолокатора;
- за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток АФАР.

Досліджувана в роботі приймально-передавальна АФАР РЛС призначена для посилення зондуючі сигналів до необхідного високого рівня потужності, випромінювання їх в заданому напрямку, прийому відбитих від цілей ехо сигналів, а також для практично без інерційного електронного сканування променів в заданому кутовому секторі по азимуту і розі місця. Функціонально до складу АФАР входять 100 підрешіток, кожна з яких складається з:

- апертури підрешітки з 64 випромінювачами;
- 16-ти чотирьох каналних антенних приймально-передавальних модулів (АПММ);
- одного приймально-передавального модуля підрешітки (ППМП);
- одного НВЧ дільника/суматора 1:16;
- 200 модулів вторинного електроживлення (МВЖ);
- внутрішньо приладної частини системи рідинного охолодження (СРО) АФАР.

АПММ (1600 штук) є найбільш численними і потужними транзисторними НВЧ модулями АФАР. До складу кожного антенного модуля входять:

- чотири приймально-передавальних канали (ППК);
- мікро полосковий дільник-суматор НВЧ сигналів;
- обчислювальний пристрій розподілу фаз і амплітуд;
- герметичний корпус з герметичними вставками для підключення випромінювачів і НВЧ коаксіальним роз'ємом.

*Визначені критерії відмов АФАР:*

- зниження до допустимого рівня відносної кількості непрацездатних ППК в АФАР;
- зниження до допустимого рівня максимальної дальності дії РЛС;
- погіршення до допустимого рівня бічних пелюсток.

Побудовані структурні схеми надійності (ССН) приймально-передавальної АФАР РЛС.

В даний час кількість випромінюючих (передавальних) каналів в 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).

*Розроблений метод побудови моделей надійності АФАР що не обслуговуються*

АФАР РЛС за своєю структурною побудовою можна ідентифікувати як ієрархічну систему з розгалуженою багаторівневою структурою, тому при розробці математичної моделі надійності АФАР використаний математичний апарат ізотропних ієрархічних систем.

Перші початкові моменти (математичне очікування і другий початковий момент кількості працездатних ППК) мають вигляд:

$$M_n^{(1)} = M_{n-1}^{(1)} a_n r_n = r_0 \prod_{i=1}^n a_i r_i, \quad (9)$$

$$M_n^{(2)} = M_{n-1}^{(2)} (a_n r_n)^2 + M_{n-1}^{(1)} a_n r_n q_n. \quad (10)$$

Отже, середня кількість працездатних випромінюючих каналів в  $k$  – рівневій структурній схемі надійності АФАР можна визначити за формулою (9). Середня кількість працездатних ППК у процесі експлуатації АФАР постійно зменшується через відмови елементів всіх рівнів ССН. Це дозволяє, сформулювавши критерії відмов, побудувати математичні моделі надійності для АФАР з ССН будь-якого рівня.

*Розроблена математична модель надійності активної фазованої антенної решітки АФАР, що не обслуговуються, з  $k$  – рівнявою ССН.*

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

$$(\Delta N)_{\text{доп.}} + 1 = N_0 \left\{ 1 - P_{\text{ППМ1}}(T_{0\text{АФАР}}) P_{\text{ППМ2}}(T_{0\text{АФАР}}) \dots P_{\text{ППМk}}(T_{0\text{АФАР}}) [P_{\text{МВЖ}}(T_{0\text{АФАР}})]^k \right\}. \quad (11)$$

Для випадку експоненціального розподілу відмов ППК і МВЖ – середнього наробітку до відмови антенної решітки з  $k$ -ою ССН визначається зі формулою:

$$\frac{T_{0\text{АФАР1}}}{T_{0\text{ППМ1}}} = - \frac{\ln\left(1 - \frac{\Delta N}{N_0} \frac{1}{N_0}\right)}{1 + \frac{T_{0\text{ППМ1}}}{T_{0\text{ППМ2}}} + \dots + \frac{T_{0\text{ППМ1}}}{T_{0\text{ППМk}}} + \frac{k T_{0\text{ППМ1}}}{T_{0\text{МВЖ}}}}. \quad (12)$$

На рис. 2 представлений графік залежності відносного наробітку до відмови антенної підрешітки –  $\frac{T_{0\_АФАР}}{T_{0\_ППК}}$  від відносної допустимої кількості відмов підрешітки –  $\frac{m_g}{G_0}$ . З рис. 2 видно, що  $T_{0\_АФАР}$  лінійно зростає зі збільшенням допустимої кількості відмов антенної підрешітки, що повністю відповідає формулі (12)

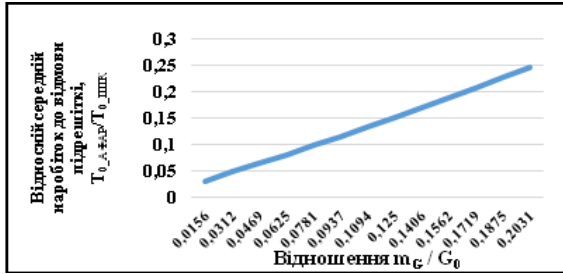


Рисунок 2. Графік залежності відносній середній наробіток до відмови підрешітки від відношення допустимого числа відмов ППК у підрешітці –  $m_g$  до загальної кількості ППК –  $G_0$  (для  $G_0 = 64$  ППК і  $\lambda_{\text{МВЖ}} = 0$ )

Для визначення імовірності безвідмовної роботи активної фазованої антенної підрешітки (з одно рівнявою ССН) використовується математична модель розрахунку надійності резервованої невідновлювальної структури зі змінним резервом (що складається з  $n$  – робочих та  $m$  – резервних елементів):

$$P_{\text{підр.}}(t) = \sum_{i=0}^{m_g} C_{G_0}^i [P_{\text{ппк}}(t)P_{\text{мвж}}(t)]^{G_0-i} [1 - P_{\text{ппк}}(t)P_{\text{мвж}}(t)]^i \quad (13)$$

де  $P_{\text{ппк}}(t)$  – імовірність безвідмовної роботи ППК;

$Q_{\text{ппк}}(t) = 1 - P_{\text{ппк}}(t)$  – імовірність відмови ППК;

$P_{\text{мвж}}(t)$  – імовірність безвідмовної роботи модуля ВЖ;

$m_g$  – допустима кількість відмов ППК у підрешітці;

$G_0$  – загальна кількість ППК у підрешітці.

Формула для визначення імовірності безвідмовної роботи активної фазованої антенної решітки з дворівневою ССН наступна:

$$P_{\text{АФАР}}(t) = \sum_{j=0}^{m_s} C_{S_0}^j [P_{\text{підр.}}(t)P_{\text{мвж}}(t)P_{\text{ппмп}}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{\text{підр.}}(t)P_{\text{мвж}}(t)P_{\text{ппмп}}(t)]^j \quad (14)$$

Розроблена та досліджена математична модель надійності приймально-передавальної АФАР РЛС, що не обслуговується, за критерієм допустимого рівня зниження максимальної дальності радіолокатору

$$\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 = \left[ P_{\text{пер.АМ}}(T_{0_{\text{АФАР}}}) + P_{\text{пер.МП}}(T_{0_{\text{АФАР}}}) + P_{\text{МЕ}}(T_{0_{\text{АФАР}}}) - 2 \right]^2 \times \quad (17)$$

$$\times \left[ P_{\text{пр.АМ}}(T_{0_{\text{АФАР}}}) + P_{\text{пр.МП}}(T_{0_{\text{АФАР}}}) + P_{\text{МЕ}}(T_{0_{\text{АФАР}}}) - 2 \right]$$

Формула для відносного середнього наробітку до відмови передавальної АФАР (рис. 3):

$$\frac{T_{0_{\text{АФАР}}}}{T_{0_{\text{пер.АМ}}}} = \frac{4 \ln \left( \frac{1}{1 - \frac{\Delta D}{D_0}} \right)}{\left( 2 + 2 \frac{T_{0_{\text{пер.АМ}}}}{T_{0_{\text{пер.МП}}}} + 3 \frac{T_{0_{\text{пер.АМ}}}}{T_{0_{\text{МЕ}}}} + \frac{T_{0_{\text{пер.АМ}}}}{T_{0_{\text{пр.АМ}}}} + \frac{T_{0_{\text{пер.АМ}}}}{T_{0_{\text{пр.МП}}}} \right)} \quad (18)$$

де  $T_{0_{\text{пер.АМ}}}$  – середній наробіток до відмови передавального каналу антенного приймально-передавального модуля; – середній наробіток до відмови передавального каналу модуля підрешітки; – середній наробіток до відмови приймального каналу антенного приймально-передавального модуля;  $T_{0_{\text{пр.АМ}}}$  – середній наробіток до відмови приймального каналу модуля підрешітки;  $T_{0_{\text{МЕ}}}$  – середній наробіток до відмови вторинного джерела живлення.

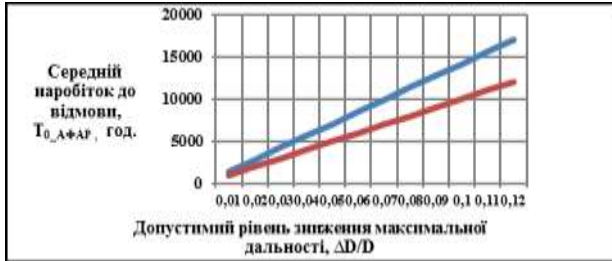


Рисунок 3. Графіки залежності середнього наробітку до відмови від допустимого рівня зниження максимальної дальності РЛС с АФАР при наступних інтенсивностях відмов каналів и модулів:  $\lambda_{\text{пер.МП}} = 0,000001 \text{ ч.}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{пер.АМ}} = 0,000007 \text{ ч.}^{-1}$ ;  $\lambda_{\text{пер.МП}} = 0,000001 \text{ ч.}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{пр.АМ}} = 0,000001 \text{ ч.}^{-1}$  Для  $\lambda_{\text{МВЖ}} = 0,000004 \text{ ч.}^{-1}$  – синя лінія, для  $\lambda_{\text{МВЖ}} = 0,000008 \text{ ч.}^{-1}$  – червона лінія

*Розроблені математичні моделі надійності АФАР РЛС, що не обслуговується, в приймальному режимі за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток*

Критерієм відмови приймально-передавальної АФАР у режимі прийому є погіршення РБП, що виявляються в перевищенні логарифма РБП АФАР вище допустимого рівня –  $\left\{ \log \left[ q \left( \frac{\Delta N}{N_0} \right) \right] \right\}_{\text{доп.}}$ , а саме:



$$\log \left\{ q \left[ \frac{\Delta N}{N_0} (t = 0) \right] \right\} - \log \left\{ q \left[ \frac{\Delta N}{N_0} (T_{0\_АФАР}) \right] \right\} \leq \left\{ \Delta \log \left[ q \left( \frac{\Delta N}{N_0} \right) \right] \right\}_{\text{доп.}} \quad (19)$$

Для аналогової АФАР, що досліджується, використовується поліноміальна залежність РБП від відносної кількості відмов  $\frac{\Delta N}{N_0}$ :

$$q_{\Sigma 0} = \sqrt{(\sigma^2) / N} = \frac{\pi}{2^M \sqrt{3N}} = \frac{\pi}{8\sqrt{3N}}, \quad (20)$$

$$q \left( \frac{\Delta N}{N_0} \right) = q_{\Sigma 0} \left[ 1 + S_1 \frac{\Delta N}{N_0} - S_2 \left( \frac{\Delta N}{N_0} \right)^2 + S_3 \left( \frac{\Delta N}{N_0} \right)^3 \right] \quad (21)$$

Для плоскої аналогової АФАР на 6400 передавальних каналів, що досліджується у дисертаційній роботі, коефіцієнти в поліноміальній залежності для РБП мають таке значення:

$$S_1 = 43,37, \quad S_2 = 221,6, \quad S_3 = 995.$$

*Розроблена математична модель надійності аналого-цифрової АФАР у режимі прийому.* Для аналого-цифрового АФАР найбільш критичним для погіршення рівня бокових пелюсток є відмови аналого-цифрових перетворювачів в приймально-передавальному модулі антенних підрешіток (ППМП). Середній наробіток до відмови АФАР за критерієм мінімуму погіршення РБП визначається з вирішення нелінійного рівняння за допустимою кількістю відмов антенних підрешіток –  $m_S$ :

$$\left[ P_{\text{МВЖ}}(T_{0\_АФАР}) \right]^2 P_{\text{ППМП}}(T_{0\_АФАР}) P_{\text{ПДР}}(T_{0\_АФАР}) = 1 - \frac{m_S}{S_0} - \frac{1}{S_0}. \quad (22)$$

Проведена перевірка на адекватність нової моделі надійності АФАР, що не обслуговується, в порівнянні з класичною моделлю надійності резервованої невідновлювальної структури з навантаженим ковзаючим резервом. Перевірка показала що при числі елементів в надлишкової структурі АФАР, рівнем 480 елементів і більш, похибка визначення середнього наробітку до відмови надлишкової структури складе 0,1 % і в подальшому зі збільшенням числа елементів похибка обчислення прагне до нуля.

**В четвертому розділі** прогноуються показники надійності та ефективності АФАР, досліджуються моделі надійності АФАР які враховують раптові і поступові відмови каналів і модулів антенної решітки. Буде удосконалено та досліджено метод визначення необхідної кількості запасних каналів і модулів АФАР за різними законами розподілу відмов.

*Прогнозування показників надійності та ефективності АФАР в процесі експлуатації.*

Розподільна структура АФАР є надлишковою системою і може перебувати в безлічі працездатних станів, що визначається відносною

кількістю відмовивших ППК. Кожному працездатному стану АФАР відповідає допустима кількість відмов у антенній фазованій підрешітці і допустима кількість умовних відмов у антенних підрешітках. Кожен працездатний стан АФАР характеризується відповідними значеннями показників ефективності та надійності: зниження рівня максимальної дальності РЛС –  $\Delta D/D_0$ , відносного наробітку до відмови АФАР –  $T_{0\_АФАР} / T_{0\_ППК}$ . Розроблена матриця прогнозування можливих технічних станів АФАР (на 6400 ППК), що досліджувалася під час обліку тільки раптових відмов ППК (експоненціальний розподіл відмов) для діапазону зміни допустимої кількості відмов в антенній підрешітці -  $m_G$  від 0 до 7 (10,5 %) і для діапазону зміни допустимої кількості умовних відмов антенних підрешіток АФАР –  $m_S$  от 0 до 5 (5 %).

В процесі проектування АФАР необхідно оцінювати показники безвідмовності і довговічності каналів, модулів і антеною решітки в цілому. Для цього доцільно застосування методу системного аналізу електронних пристроїв.

*Удосконалені та досліджені математичні моделі надійності типових структур АФАР за різними законами розподілу часу до відмови НВЧ модулів, що ураховують наявність раптових і поступових відмов.*

*Типові структури приймальних ФАР характеризуються 5 % надмірністю:*

– *Структура на 64 підрешітки*, допустима відмова 3-х підрешіток. Тобто, загальна кількість підрешіток (основних та резервних) підрешіток у приймальній ФАР складає , а кількість резервних підрешіток складає  $m = 3$ ;

– *Структура на 256 підрешіток*, допустима відмова 12 підрешіток.

Тобто, загальна кількість (основних та резервних) підрешіток у приймальній ФАР складає  $N = n + m = 256$ , а кількість резервних підрешіток складає .

*Типові структури передавальних ФАР характеризуються 10 % надмірністю:*

– *Структура на 1024 НВЧ випромінювачів*, допустима відмова 10 % випромінювачів. Конструктивне випромінювачі скомпоновані у НВЧ модулі – по 4 випромінювача у кожному модулі. Тобто, загальна кількість (основних та резервних) НВЧ модулів у передавальній ФАР складає  $N = n + m = 256$ , а кількість резервних НВЧ модулів складає  $m = 25$ ;

– *Структура на 4096 НВЧ випромінювачів*, допустима відмова 10 % випромінювачів. Конструктивне випромінювачі скомпоновані у НВЧ модулі – по 4 випромінювача у кожному модулі. Тобто, загальна кількість (основних та резервних) НВЧ модулів у передавальній ФАР складає  $N = n + m = 1024$ , а кількість резервних НВЧ модулів складає  $m = 102$  .

На рис. 4 і рис. 5 представлені номограми для розрахунку імовірності безвідмовної роботи нормованих інтенсивностей відмов типових структур АФАР за різними законами розподілу НВЧ каналів решітки.

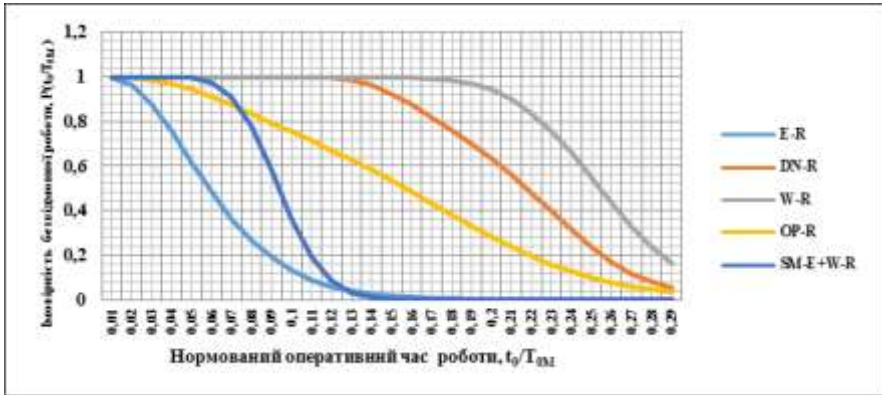


Рисунок 4. Номограма для визначення імовірності безвідмовної роботи передавальної одно рівнявою АФАР (структура складається із 256 НВЧ каналів у тому числі 25-ти резервних каналів) для п'яти різних законів розподілу часу до відмови НВЧ каналів

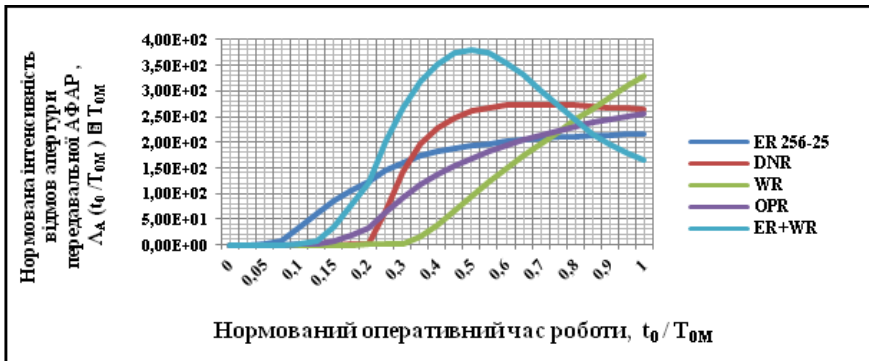


Рисунок 5. Номограма для визначення нормованої інтенсивності відмов передавальної АФАР (структура складається із 256 НВЧ модулів, у тому числі 25-ти резервних модулів) для п'яти різних законів розподілу часу до відмови НВЧ модулів

*Дослідження моделей надійності дворівневою АФАР по критерію допустимого зниження максимальної дальності РЛС при різних розподілах відмов приймально-передавальних каналів*

На рис. 6. представлена узагальнена номограма залежності відносного нарробітку до відмови АФАР –  $T_{0\_АФАР\_1}/T_{0\_ППК}$  від допустимого рівня відносного зниження максимальної дальності РЛС для різних законів розподілу відмов ППК.

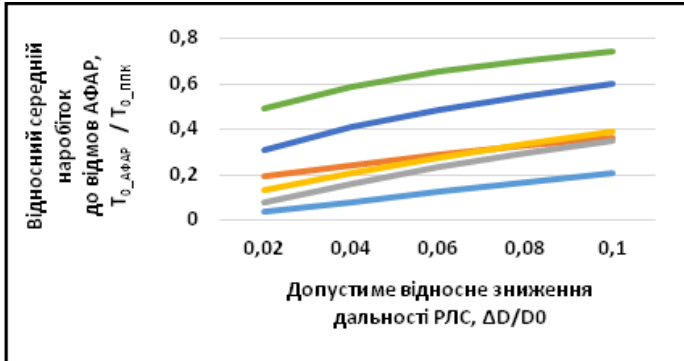


Рисунок 6. Узагальнена номограма залежності відносного середнього нарробітку до відмови фазованої антенної решітки –  $T_{0\_АФАР\_1} / T_{0\_ППК}$  від допустимого рівня зниження максимальної дальності РЛС за різними законами розподілу відмов ППК: експоненціального (ER) – лінія блакитного кольору; розподілу Вейбула: WR0 – лінія жовтого кольору; WR1 – лінія синього кольору; WR2 – лінія фіолетового кольору; дифузійного немонотонного розподілу (DNR) – лінія коричневого кольору; композиції експоненціального і дифузійного немонотонного (ER/2\*DNR/2) розподілів – лінія фіолетового кольору

#### *Оцінка ефективності методів резервування надвисокочастотних модулів структур активної фазованої антенної решітки*

Ефективність методів резервування НВЧ каналів структур АФАР оцінюється виграшом у надійності: за середнім нарробітком на відмову  $G_T$  і за імовірністю відмови  $G_Q$ .

Виграшом у надійності називається відношення показника надійності резервованої системи до відповідного показника надійності нерезеровваної системи.

Формули для виграшу у надійності за середнім нарробітком до відмови мають вигляд:

– для експоненціального розподілу часу до відмови НВЧ каналів:

$$G_T = -(N - m) \ln \left( 1 - \frac{m}{N} - \frac{1}{N} \right), \quad (23)$$

– для розподілу Вейбулла часу до відмови НВЧ каналів:

$$G_T = \frac{(N-m) \left[ -\ln \left( 1 - \frac{m}{N} - \frac{1}{N} \right) \right]^{1/b}}{\Gamma \left( 1 + \frac{1}{b} \right)}, \quad (24)$$

– для довільного розподілу часу до відмови НВЧ каналів:

$$G_T = \frac{(N-m)T_{0\_A}}{T_{0\_M}}, \quad (25)$$

де відношення  $\frac{T_{0\_A}}{T_{0\_M}}$  визначається за рішенням трансцендентного рівняння (11). Виграш у надійності за імовірністю до відмови визначається за формулою:

$$G_Q = \frac{1 - [P_M(z_0)]^{N-m}}{1 - \sum_{j=0}^m [P_M(z_0)]^{N-j} [1 - P_M(z_0)]^j}. \quad (26)$$

Досліджені моделі надійності АФАР 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 виграш у розмірі 40 %–90 % в порівнянні з використанням експоненціального розподілу відмов.

*Визначена необхідна кількість запасних частин для забезпечення заданого ресурсу РЛС за різними розподілами відмов каналів і модулів*

Формули для визначення необхідної кількості запасних каналів і модулів для часу, що відповідає гамма-відсотковому ресурсу АФАР мають вигляд:

– для приймально-передавальних каналів (ППК):

$$Z_{\text{ППК}}(Y_{\text{АФАР}}) = N_{0\_\text{ППК}} [1 - P_{\text{ППК}}(T_{Y_{\text{АФАР}}})] + 1, \quad (27)$$

– для приймально-передавальних модулів підрешітки (ППМП):

$$Z_{\text{ППМП}}(Y_{\text{АФАР}}) = S_0 [1 - P_{\text{ППМП}}(T_{Y_{\text{АФАР}}})] + 1, \quad (28)$$

– для модулів вторинного електроживлення (МВЖ):

$$Z_{\text{МВП}}(\gamma_{\text{АФАР}}) = N_{0\_МВП} [1 - P_{\text{МВЖ}}(T_{\gamma_{\text{АФАР}}})] + 1. \quad (29)$$

Протягом заданого ресурсу РЛС –  $T_{\text{Зад.рес.рлс}}$  може проводитися кілька профілактичних (корегувальних) заміन каналів і модулів. Кількість (число) профілактичних замін модулів, що відмовили - протягом заданого терміну служби визначається за формулою:

$$\epsilon_{\text{АФАР}} = T_{\text{Зад.рес.рлс}} / T_{\gamma_{\text{АФАР}}}. \quad (30)$$

Формули для визначення кількості запасних каналів і модулів (ППК, ПМ, ВП) для забезпечення ресурсу і терміну служби АФАР РЛС до проведення капітального ремонту мають вигляд:

$$Z_{\text{ППК}}(T_{\text{Зад.рес.рлс}}) = \epsilon_{\text{АФАР}} Z_{\text{ППК}}(\gamma_{\text{АФАР}}), \quad (31)$$

$$Z_{\text{ППМП}}(T_{\text{Зад.рес.рлс}}) = \epsilon_{\text{АФАР}} Z_{\text{ППМП}}(\gamma_{\text{АФАР}}), \quad (32)$$

$$Z_{\text{МВП}}(T_{\text{Зад.рес.рлс}}) = \epsilon_{\text{АФАР}} Z_{\text{МВП}}(\gamma_{\text{АФАР}}). \quad (33)$$

Визначена необхідна кількість запасних частин для забезпечення заданого ресурсу РЛС за різними розподілами відмов каналів і модулів (рис. 7 і рис. 8).

Проведені обчислення необхідної кількості запасних частин за формулами (27–33) для забезпечення заданого ресурсу РЛС за такими розподілами відмов каналів і модулів: експоненціальному (ER), дифузійному немонотонному (DNR), композиції експоненціального і дифузійного немонотонного ( $ER/2 \times DNR/2$ ), Вейбулла (WR).

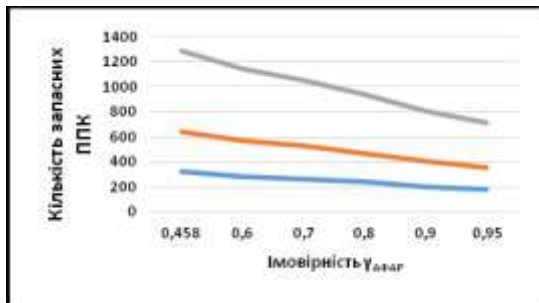


Рисунок 7. Номограма для визначення графіків необхідної кількості запасних каналів ППК залежно від імовірності –  $\gamma_{\text{АФАР}}$  для різних значень кількості ППК

в АФАР: для  $N_0 = 3200$  – графік синього кольору; для  $N_0 = 6400$  – графік червоного кольору; для  $N_0 = 12800$  – графік фіолетового кольору

### Приклад 1

Необхідно визначити необхідну кількість запасних ППК для чотирьох законів розподілу відмов: ER, DNR, композиції розподілів ER/2×DNR/2 і WR під час допустимого зниження максимальної дальності РЛС –  $\Delta D/D_0 = 0,10$  (результати дивись у табл. 2). Вихідні дані прикладу 1:

$$N_{0\_ппк} = 6400, T_{\text{призн.рес.}_\text{АФАР}} = 20000 \text{ год.}, T_{0\_ппк} = 50000 \text{ год.}, \gamma_{\text{АФАР}} = 0,80.$$

Таблиця 2

### Результати визначення необхідної кількості запасних ППК до капітального ремонту АФАР

Тип розподілу ППК	$T_{\gamma\_АФАР}/T_{0\_ппк}$	$T_{\gamma\_АФАР}$ , ГОД	$\epsilon_{\text{АФАР}} = T_{\text{призн.рес.}_\text{РЛС}} / T_{\gamma\_АФАР}$	$Z_{\text{ППК}}(T_{\text{призн.рес.}_\text{РЛС}})$
ER	0,07638	3819	5,24	2472
DNR	0,2106	10530	1,90	897
ER/2*DNR/2	0,1688	8440	2,37	1119
WR	0,1994	9970	2,01	947

Розроблені практичні рекомендації щодо визначення необхідної кількості запасних модулів антенної решітки для різних стратегій експлуатації та ТО АФАР РЛС (рис. 8).

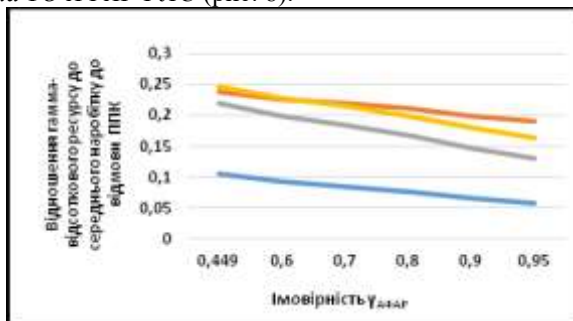


Рисунок 8. Номограма для визначення графіків залежності відносного гамма-відсоткового ресурсу АФАР –  $T_{\gamma\_АФАР}/T_{0\_ппк}$  за допустимим зниженням максимальної дальності РЛС –  $\Delta D/D_0 = 0,10$  для різних розподілів відмов ППК

залежно від імовірності –  $\gamma_{\text{АФАР}}$  (гамма): для ER – графік синього кольори; для композиції розподілів ER/2×DNR/2 – графік червоного кольору; для WR – графік жовтого кольору; для DNR – графік червоного кольору

Як видно з табл. 2 найбільшу кількість запасних ППК у складі ЗІП необхідна за наявності тільки раптових відмов ППК (ER), найменша кількість запасних ППК необхідна в разі тільки поступових відмов ППК (ER і DNR). Найцікавіший випадок має місце при наявності 50 % раптових і поступових відмов ППК (характерний для потужних НВЧ транзисторів). Виходить, що при наявності 50 % раптових і поступових відмов ППК (композиція ER/2×DNR/2) потрібна кількість запасних ППК має бути в 2,2 менше, ніж за наявності тільки раптових відмов.

У табл. 3. наведені значення необхідної кількості запасних ППК АФАР РЛС ППК для реалізації чотирьох стратегій експлуатації та ТО.

Таблиця 3

## Значення необхідної кількості запасних ППК АФАР РЛС

Номер стратегії експлуатації і ТО АФАР	Кількість запасних ППК для забезпечення $T_{0 \text{ АФАР}}, Z(T_{0 \text{ АФАР}})$		Кількість запасних ППК для забезпечення $T_{\text{призн.сл. АФАР}}, Z(T_{\text{призн.сл. АФАР}})$	
	$\Delta N/N_0 = 0,1$	$\Delta N/N_0 = 0,2$	$\Delta N/N_0 = 0,1$	$\Delta N/N_0 = 0,2$
	1-а, $\gamma = 0,458$	642	1282	642 ε
2-а, $\gamma = 0,60$	572	1192	572 ε	1192 ε
3-я, $Z(T_{0 \text{ АФАР}}) - 1$	641	1281	(642-1) ε	(1282 -1) ε
4-а, $\gamma = 0,80$	472	1052	472ε	1052ε

Результат обчислень потрібної кількості запасних ППК показав що:

– потрібна кількість запасних каналів і модулів для проведення поточного ремонту АФАР не залежить від типу закону розподілу відмов;

– від типу закону розподілу відмов залежать тільки значення гамма-відсоткового ресурсу АФАР, на підставі яких визначалося потрібна кількість запасних каналів і модулів (мінімальні для ER і максимальні для DNR і WR).

**В п'ятому розділі** розроблені математичні моделі надійності АФАР що обслуговуються з одно рівнявою і двох рівнявою структурною схемою надійності. Розбудовані номограма і графіки залежності коефіцієнту технічного використання від середнього наробітку до відмови ППК і середнього часу технічного обслуговування АФАР.

Основним показником надійності АФАР що обслуговуються з одно рівнявою ССН є коефіцієнт технічного використання:



$$K_{ТВ\_АФАР} = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i \left[ K_{ТВ\_ППК} K_{ТВ\_МВЖ} \right]^{G_0-i} \left[ 1 - K_{ТВ\_ППК} K_{ТВ\_МВЖ} \right]^i. \quad (34)$$

де

$$K_{ТВ\_МВЖ} = \frac{T_{0\_МВЖ}}{T_{0\_МВЖ} + \tau_{проф}} \quad (35)$$

відповідно, коефіцієнти технічного використання ППК та МВЖ,  $m_G$  – допустима кількість відмов ППК у антенній підрешітці (АФАР із однорівневої ССН);  $G_0$  – загальна кількість ППК у підрешітці (АФАР із однорівневої ССН).

При  $T_{0\_МВЖ} \geq 10T_{0\_ППК}$ , формула для спрощується, та має вигляд:

$$K_{ТВ\_{ОДНОРІВН}, АФАР} \approx \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i \left[ K_{ТВ\_ППК} \right]^{G_0-i} \left[ 1 - K_{ТВ\_ППК} \right]^i. \quad (36)$$

*Розроблення математичних моделей надійності АФАР що обслуговуються з двома рівнявою структурною схемою надійності*

Для АФАР з дворівневою ССН формули для коефіцієнта технічного використання мають наступний вигляд:

$$K_{ТВ\_{ДВОХРІВН}, АФАР} \approx \sum_{i=0}^{m_S} C_{S_0}^i \left[ K_{ТВ\_ПДР} \right]^{S_0-i} \left[ 1 - K_{ТВ\_ПДР} \right]^i, \quad (37)$$

де

$$K_{ТВ\_ПДР} = \frac{T_{0\_ПДР}}{T_{0\_ПДР} + \tau_{проф}}. \quad (38)$$

середній наробіток підрешітки

$$T_{0\_ПДР} = T_{0\_ППК} \frac{\ln \frac{1}{\left( 1 - \frac{\Delta G}{G_0} - \frac{1}{G_0} \right)}}{\left( 1 + \frac{1}{T_{0\_ППК}} + \frac{1}{T_{0\_ПМП}} + \frac{2}{T_{0\_МВЖ}} \right)} \quad (39)$$

Для визначення вимог до середнього часу технічного обслуговування АФАР –  $\tau_{ТО.ВИМ}$  для забезпечення потрібного значення коефіцієнта технічного використання  $K_{ТВ\_АФАР\_ВИМ}$  необхідно рішення трансцендентних рівнянь:

– для АФАР з одно рівнявою ССН:

$$\begin{aligned}
& K_{ТВ\_АФАР\_ВИМ}(\tau_{ТО\_ВИМ}) = \\
& = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i \left[ K_{ТВ\_ППК}(\tau_{ТО\_ВИМ}) K_{ТВ\_МВЖ}(\tau_{ТО\_ВИМ}) \right]^{G_0-i} \times \quad (40) \\
& \times \left[ 1 - K_{ТВ\_ППК}(\tau_{ТО\_ВИМ}) K_{ТВ\_МВЖ}(\tau_{ТО\_ВИМ}) \right]^i.
\end{aligned}$$

– для АФАР з дворівневою ССН:

$$\begin{aligned}
& K_{ТВ\_ДВ\_АФАР\_ВИМ} = \\
& = \sum_{i=0}^{m_S} C_{S_0}^i \left[ K_{ТВ\_ПДР}(\tau_{ТО\_ВИМ}) \right]^{S_0-i} \left[ 1 - K_{ТВ\_ПДР}(\tau_{ТО\_ВИМ}) \right]^i. \quad (41)
\end{aligned}$$

На рис. 11 представлені графіки які дозволяють визначати вимоги до середнього часу технічного обслуговування ППК та спланувати роботи з технічному обслуговуванню АФАР з одно рівнявою ССН для забезпечення необхідного значення коефіцієнта технічного обслуговування.

**Приклад 2.** Потрібно забезпечити значення коефіцієнта технічного обслуговування  $K_{ТВ} = 0,990$  для АФАР з двох рівнявою ССН з 6400 ППК. Середній наробіток на відмову ППК складає  $T_{0\_ППК} = 25000$  год. Відносна допустима кількість відмов ППК складає  $\Delta N/N_0 = 0,10$ .

*Рішення прикладу 2*

На рис. 9 для  $\Delta N/N_0 = 0,10$  знаходимо потрібне значення середнього часу технічного обслуговування АФАР –  $\tau_{ТО} = 180$  год.

Розроблені математичні моделі АФАР що обслуговуються можуть дозволити персоналу великих РЛС збудувати ефективні плани технічного обслуговування АФАР для забезпечення необхідного коефіцієнту технічного використання.

**В шостому розділі** розроблені структурні схеми і математичні моделі проведення оптимального технічного обслуговування РЛС с АФАР в період гарантійної експлуатації. Побудовані стратегії експлуатації та ТО по наробітку і фактичному стану РЛС с АФАР, розроблені методи і алгоритми реалізації цих стратегій.

*Досліджені математичні моделі оптимізації ТО АФАР РЛС з одно- і дворівневою ССН та визначені основні техніко-економічні характеристики і критерії оптимізації ТО.*

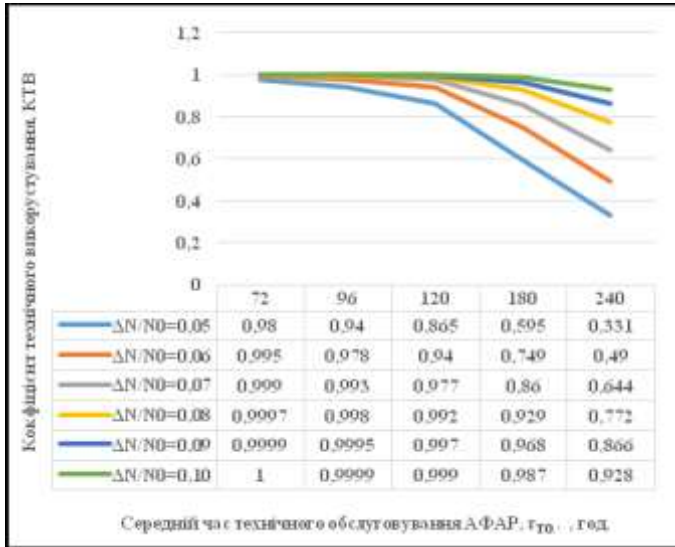


Рисунок 9. Графіки залежності коефіцієнта технічного використання АФАР з дворівневою ССН (на 6400 ППК) від середнього часу технічного обслуговування при  $T_0_{\text{ППК}} = 25\ 000$  год. і  $T_0_{\text{ПДР}} = 3338$  год

Позначимо:  $\tau$  – періодичність ТО АФАР;  $\tau_n$  і  $c_n$  – відповідно тривалість та вартість проведення ТО АФАР;  $\tau_p$  і  $c_p$  – відповідно, тривалість та вартість збитку під час АФАР;  $-$  імовірність безвідмовної роботи (ІБР) АФАР.

Тоді аналітичний вираз для КТВ однотипних АФАР має вигляд:

$$K_{\text{ТВ}}(\tau) = \frac{\tau}{\tau + \tau_n - \tau_p \ln P_{\text{АФАР}}(\tau)}. \quad (42)$$

Аналітичний вираз математичного очікування (м.о.) ПЕВ для однотипних ФАР:

$$M[C(\tau)] = \frac{c_n - c_p \ln P_{\text{АФАР}}(\tau)}{\tau}, \quad (43)$$

$$\text{де} \quad \tau_n = \tau_{n1} \{1 + N[1 - P_{\text{ППК}}(\tau)]\} \quad c_n = c_{n1} \{1 + N[1 - P_{\text{ППК}}(\tau)]\} \quad (44)$$

тут  $\tau_{n1}$ ,  $c_{n1}$  – відповідно тривалість та вартість ТО одного ППК розподільної структури АФАР,  $N$  – кількість ППК розподільної структури АФАР. Оптимальна періодичність у прямій та зворотній задачах оптимізації ТО АФАР визначаються за узагальненим трансцендентним рівнянням:

$$\Theta(\tau) = \varepsilon, \text{ де } \Theta(\tau) = \frac{\ln[P_{\text{АФАР}}(\tau)] + \tau \Lambda_{\text{АФАР}}(\tau)}{N[1 - P_{\kappa}(\tau) - \tau f_{\kappa}(\tau)]} \quad (45)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\tau_{\text{пл}}}{\tau_{\text{р}}} - \text{під час оптимізації за критерієм max КТВ} \\ \frac{C_{\text{пл2}}}{C_{\text{р}}} - \text{під час оптимізації за критерієм min м.о. ПЕВ} \end{cases} \quad (46)$$

де  $\Lambda_{\text{АФАР}}(\tau)$  – інтенсивність відмов АФАР,  $P_{\text{ППК}}(\tau)$ ,  $f_{\text{ППК}}(\tau)$  – імовірність та щільність розподілу відмов ППК розподільної АФАР.

За експоненціальному розподілу формули імовірність безвідмовної роботи ППК мають вигляд:

$$P_{\text{ППК}}(\tau) = \exp(-\lambda_{\text{ППК}}\tau), \quad f_{\text{ППК}}(\tau) = \lambda_{\text{ППК}} \exp(-\lambda_{\text{ППК}}\tau). \quad (47)$$

Аналітичний вираз для імовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов АФАР з одно рівнявою ССН має вигляд:

$$P_{\text{АФАР}}(\tau) = \sum_{j=0}^m C_N^j [P_{\text{ППК}}(\tau)]^{N-j} [1 - P_{\text{ППК}}(\tau)]^j, \quad (48)$$

$$\Lambda_{\text{АФАР}}(\tau) = \frac{n \lambda_{\text{ППК}} C_N^m [1 - P_{\text{ППК}}(\tau)]^m [P_{\text{ППК}}(\tau)]^n}{P_{\text{АФАР}}(\tau)}. \quad (49)$$

Ефективність оптимізації ТО АФАР оцінюється виграшами від оптимізації:

– виграш за КТВ:

$$W[K_{\text{ТИ}}(\tau_{\text{опт}})] = \left\{ 1 - \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} K_{\text{ТИ}}(\tau)}{K_{\text{ТИ}}(\tau_{\text{опт}})} \right\} \times 100 \% \quad (50)$$

– виграш за м.о. ПЕВ:

$$W\{M[C(\tau_{\text{опт}})]\} = \left\{ 1 - \frac{M[C(\tau_{\text{опт}})]}{\lim_{n \rightarrow \infty} M[C(\tau)]} \right\} \times 100 \% \quad (51)$$

### Приклад 3

Дослідження моделі оптимізації ТО двох типів структур АФАР.

На рис. 10 и рис. 11 представлені номограми для визначення оптимальної періодичності ТО двох типових розподільчих структур АФАР з одно рівнявою ССН.

– 1-ша структура АФАР – загальне число ППК –  $N=256$ , число допустимих відмов ППК –  $m_G=12$ ;

– 2-га структура АФАР – загальне число ППК –  $N=256$ , число допустимих відмов ППК –  $m_G=25$ .

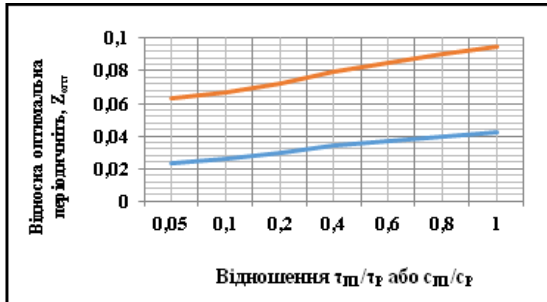


Рисунок 10. Номограма для визначення відносної оптимальної періодичності ТО АФАР –  $Z_{\text{опт}} = \frac{\tau_{\text{опт}}}{T_{0к}}$  в залежності від відношення  $\frac{\tau_{п1}}{\tau_{р}} \left( \frac{c_{п1}}{c_{р}} \right)$  (синя лінія – 1-ша структура АФАР, червона лінія – 2-га структура АФАР)

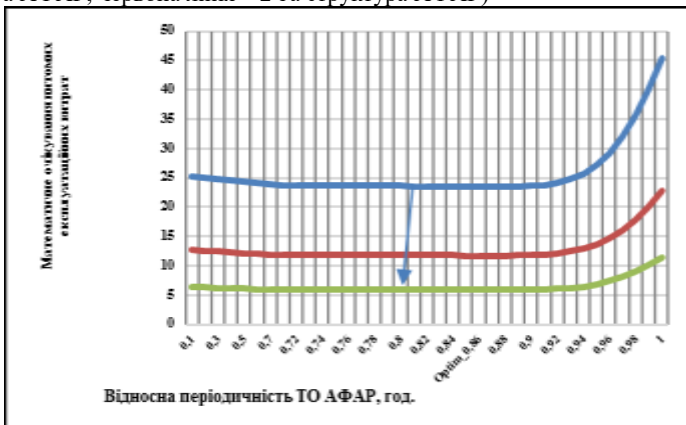


Рисунок 11. Графіки залежності математичного очікування питомих експлуатаційних витрат від періодичності проведення технічного обслуговування АФАР з дворівневою ССН для різних значень інтенсивності відмов випромінюючих каналів:  $\lambda_{ппк} = 0,000005$  1/год. – синього кольору;  $\lambda_{ппк} = 0,00001$  1/год. – червоного кольору;  $\lambda_{ппк} = 0,00002$  1/год. – зеленого кольору

Розроблені та досліджені математичні моделі оптимізації ТО групи з декількох АФАР, розміщених в одному антенному посту РЛС при немонотонному дифузійному і експоненціальному розподілах відмов ППК (див. рис. 12 і рис. 13).

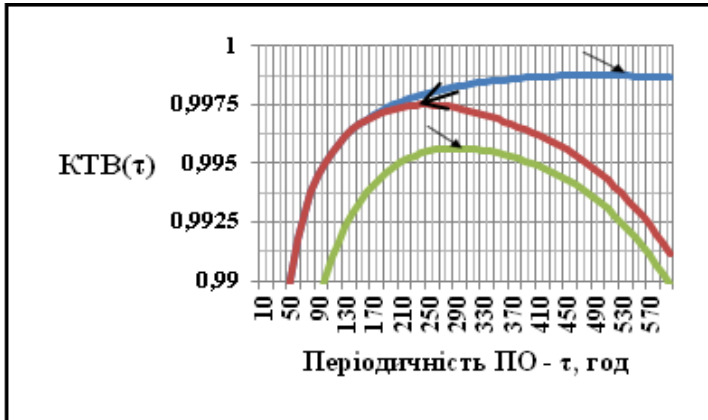


Рисунок 12. Залежність КТВ від періодичності ТО для приймальної АФАР (верхня крива –  $\tau_{1opt}=490$  год), передавальної АФАР (середня крива –  $\tau_{2opt}=250$  год) і групи АФАР (нижня крива –  $\tau_{гр.орг}=300$  год) для ДНР відмов НВЧ каналів АФАР

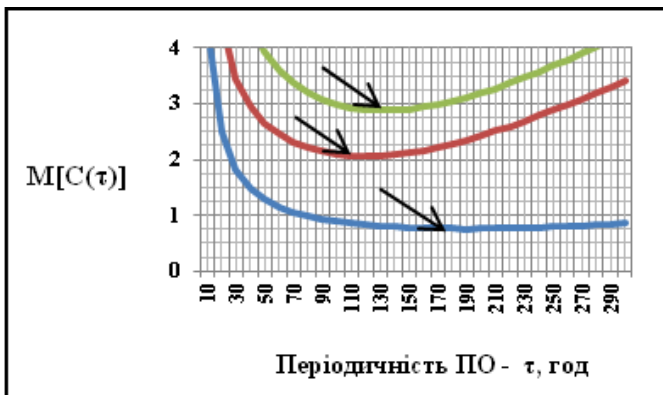


Рисунок 13. Залежність м.о. ПЕВ від періодичності ТО для приймальної АФАР (нижня крива –  $\tau_{1opt}=190$  год), для передавальної АФАР (середня крива –  $\tau_{2opt}=120$  год) і для групи АФАР (верхня крива –  $\tau_{1opt}=130$  год) при ЕР відмов каналів АФАР

Оптимізація ТО АФАР дозволяє отримати вигоду з математичного очікування питомих експлуатаційних витрат у розмірі 15 %–45 %.

*Розроблені та досліджені методи реалізації чотирьох стратегій експлуатації та проведення ТО в процесі післягарантійного обслуговування АФАР РЛС.*

Розроблена структурна схема взаємозв'язку стратегій експлуатації ТО. Кожна АФАР РЛС може експлуатуватися до вироблення ресурсу або до передвідмовного стану. Під час експлуатації до вироблення ресурсу контрольованим показником надійності є гамма-відсотковий ресурс. При цьому можливі дві стратегії ТО АФАР: за наробітком або за станом з адитивним контролем показників надійності.

*Стратегія експлуатації і ТО АФАР за наробітком до вироблення ресурсу (терміну служби) – перша стратегія експлуатації і ТО АФАР – це експлуатація РЛС АФАР до моменту вироблення гамма-відсоткового ресурсу –  $T_{\gamma \text{ АФАР}}$  або моменту прояви допустимої кількості відмов модулів антенної решітки (АППМ і ППМП).*

*Стратегія експлуатації і ТО АФАР за станом з адитивним контролем показників надійності до вироблення ресурсу (терміну служби) – друга стратегія експлуатації і ТО АФАР) – це експлуатація РЛС АФАР до моменту вироблення гамма-відсоткового ресурсу –  $T_{\gamma \text{ АФАР}}$  або моменту прояви допустимої кількості відмов модулів антенної решітки (АППМ і ППМП).*

*Стратегія експлуатації і ТО АФАР до перед відмовного стану з контролем параметрів (працездатності) модулів антеною решітки-третья стратегія експлуатації і ТО АФАР – це експлуатація АФАР до моменту прояви часу передостаннього відмови модуля (з допустимою кількістю відмов АППМ або ППМП).*

*Стратегія експлуатації і ТО АФАР до перед відмовного стану з адитивним контролем показників надійності (середнього наробітку до відмови і ймовірностей безвідмовної роботи) – четверта стратегія експлуатації і ТО АФАР – це експлуатація АФАР до моменту прояви часу передостаннього відмови модуля (з допустимою кількістю відмов АППМ і ППМП).*

*Розроблений метод реалізації стратегій експлуатації та ТО АФАР РЛС за наробітком і станом.*

Для досягнення даної мети необхідно вирішення наступних завдань:

а) Визначення (з розроблених раніше в третьому розділі) математичних моделей надійності модулів антенної решітки і АФАР в цілому;

б) Вибір методу обробки статистичної інформації про відмови модулів антенної решітки в процесі експлуатації;

с) Розробка методу визначення показників надійності для стратегії ТО АФАР за наробітком;

д) Розробка методу та алгоритму індивідуального прогнозування показників надійності і показників ТО АФАР для стратегій експлуатації та ТО АФАР за наробітком і станом на основі обробки статистичної інформації про відмови модулів антенної решітки;

е) Розробка методу реалізації третьої і четвертої стратегії експлуатації і ТО АФАР до перед відмовного стану;

ф) Порівняння стратегій експлуатації та ТО АФАР.

При визначенні математичної моделі відмов модулів (каналів) АФАР вибирається композиція експоненціального (ЕР) і дифузійного немонотонного розподілів (ДНР). При цьому повна інтенсивність відмов модулів (каналів) визначається як сума інтенсивностей раптових і поступових відмов:

$$\lambda_{\text{мод.повн.відм.}} = \lambda_{\text{мод.рапт.відм.}} + \lambda_{\text{мод.пост.відм.}} \quad (52)$$

$$\lambda_{\text{мод.рапт.відм.}} = C_1 \lambda_{\text{мод.повн.відм.}}, \lambda_{\text{мод.пост.відм.}} = C_2 \lambda_{\text{мод.повн.відм.}} \quad (53)$$

$$C_1 < 1,00; C_2 < 1,00; C_1 + C_2 = 1,00 \quad (54)$$

Тоді імовірність безвідмовної роботи (ІБР) модулів розподіленої структури АФАР визначається як добуток експоненціального розподілу і дифузійного немонотонного розподілу при спільній прояве раптових і поступових відмов модулів:

$$P_{\text{мод.}}(t) = P_{\text{мод.рапт.відм.}}(t) \times P_{\text{мод.пост.відм.}}(t) \quad (55)$$

При виборі моделі надійності АФАР використовуються математична модель надійності АФАР з дворівневої структурної схемою надійності, яка представлена в третьому розділі

Для обробки статистичної інформації про відмови модулів АФАР і визначення оцінок вибіркової середньої, верхньої та нижньої довірчих меж використовується метод квантилів.

*Розроблений метод визначення показників надійності і ТО для стратегій експлуатації та ТО АФАР за наробітком і фактичним станом*

У процесі нормальної експлуатації АФАР РЛС апаратурою контролю:

– проводиться збір, зберігання і обробка статистичної інформації про відмови модулів антенних підрешіток;

– виконуються обчислення (прогнозування) рівня надійності каналів і модулів розподіленої структури АФАР;

– обчислюються індивідуальні прогностичні оцінки фактичного рівня імовірності безвідмовної роботи і гамма-відсоткового ресурсу для кожної конкретної АФАР;

– виробляються рекомендації по часу проведення та обсягу коригувальних заміन (КЗ) каналів і модулів антенної решітки, що відмовили для кожної конкретної АФАР.

Після кожної серії відмов модулів даного типу необхідно визначити точкові і інтервальні оцінки на підставі статистичної інформації про час виявлення відмов цих модулів:

– для визначення показників безвідмовності каналів і модулів даного типу;



- для визначення показників безвідмовності і довговічності АФАР в цілому;
- для визначення інтервалів часу між відмовами каналів і модулів даного типу;
- для прогнозування моментів часу настання слідуєчих відмов модулів даного типу.

За результатами обробки отриманих даних прогноуються моменти часу виявлення подальшої серії відмов каналів і модулів даного типу і приймається рішення про необхідність і час проведення коригувальних замін. При цьому основною умовою необхідності проведення коригувальних замін каналів і модулів даного типу для стратегії експлуатації і ТО АФАР за наробітком буде прогнозоване зниження значення імовірності безвідмовної роботи АФАР до рівня нижче  $1-\gamma$ . Тобто коригуюча заміна модулів даного типу може проводитися тільки після вироблення конкретної АФАР гамма-відсоткового ресурсу –  $T_{\gamma, \text{АФАР}}$ . На основі стратегій ТО АФАР РЛС за наробітком і попереднім станом з адитивним контролем показників надійності розроблені два алгоритми індивідуального прогнозування показників надійності і показників ТО АФАР.

**В сьомому розділі** пропонуються практичні рекомендації щодо забезпечення високої експлуатаційної надійності та ефективності в процесі розробки і експлуатації АФАР РЛС.

*Представлені практичні рекомендації щодо визначення вимог до показників надійності та експлуатації під час створення РЛС з АФАР.*

Створення нових РЛС з АФАР проводиться на основі технічного завдання, в якому сформулюється комплекс технічних та техніко-економічних вимог, а також порядок проведення всіх робіт з розробки на стадіях аван-проекту, ескізного проекту, технічного проекту, розробки РКД, виготовлення і випробування дослідних зразків станції. Вимоги до показників надійності, ефективності експлуатації і ТО РЛС визначаються комплексом військових і цивільних стандартів.

Оскільки АФАР є складовою частиною РЛС, то вимоги до показників надійності АФАР визначаються на початкових стадіях проектування після розподілу вимог щодо надійності за складовими частинами РЛС. Також уточнюються вимоги за показниками надійності щодо експлуатації, ТО і ремонту РЛС.

*Розроблені методичні вказівки і алгоритми реалізації стратегій експлуатації та ТО АФАР*

Для реалізації стратегій ТО АФАР РЛС за наробітком і попереднім станом з адитивним контролем показників надійності розроблені два алгоритми індивідуального прогнозування показників надійності і ТО АФАР.

Цими алгоритмами реалізується виконання наступних завдань:

- обчислення статистичних оцінок вибіркової середньої, верхньої та нижньої довірчих меж показників середнього наробітку до відмови модулів антенних підрешіток;

– індивідуальне прогнозування показників надійності АФАР: часу настання чергової відмови модуля; імовірності безвідмовної роботи, середнього наробітку до відмови і гамма-відсоткового ресурсу АФАР в цілому;

– індивідуальне прогнозування показників ТО АФАР: часу проведення та обсягів коригувальних заміні модулів антенних підрешіток у процесі експлуатації.

Представлений приклад реалізації другої стратегії експлуатації і ТО за станом з адитивним контролем показників надійності на прикладі передавальної АФ.

В розроблених алгоритмах реалізовані формули для послідовного покрокового обчислення статистичних оцінок показників надійності модулів антенної решітки (АППМ і ППМП) і АФАР у цілому. Також реалізовані формули для обчислення моментів часу виконання і визначення кількості коригувальних заміні модулів антенної решітки.

## ВИСНОВКИ

Вирішена наукова проблема розроблення методології підвищення ефективності технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційної станції, що дозволило визначити нові підходи до методів технічного обслуговування в сучасних умовах.

1. Уперше визначені критерії відмов та розроблений метод побудови математичних моделей надійності АФАР, що не обслуговуються, зі структурною схемою будь-якого  $k$  – рівня складності які на відміну від відомих використовують теорію ізотропних ієрархічних систем.

2. Уперше розроблені та досліджені математичні моделі надійності АФАР, що не обслуговуються, зі структурною схемою надійності  $k$  - рівня складності за критерієм допустимого зниження рівня працездатних випромінювачів НВЧ каналів антенної решітки, які можуть використовуватися під час проектування передавальних і приймально-передавальних РЛС. Виконана перевірка на адекватність розробленої моделі надійності АФАР, що не обслуговуються, в порівнянні з класичною моделлю надійності резервованої невідновлювальної структури з навантаженим ковзаючим резервом. Перевірка показала що при числі елементів в надлишкової структурі АФАР, рівному 480 елементів і більше, похибка визначення середнього наробітку до відмови надлишкової структури складе 0,1% і в подальшому зі збільшенням числа елементів похибка обчислення прагне до нуля.

3. Уперше розроблена математична модель надійності АФАР, що не обслуговуються, за критерієм допустимого зменшення максимальної дальності радіолокатора яка може використовуватися під час проектування передавальних та приймально-передавальних РЛС.

4. Уперше розроблені математичні моделі надійності АФАР, що не обслуговуються, за критерієм допустимого погіршення рівня бокових пелюстків для аналогової і аналого-цифрової АФАР які можуть

використовуватися під час проектування приймальних і приймально-передавальних РЛС.

5. Уперше розроблені математичні моделі надійності АФАР, що обслуговуються, які можуть використовуватися при експлуатації та ТО великих РЛС з постійним обслуговуючим персоналом, які можуть дозволити персоналу великих РЛС збудувати ефективні плани технічного обслуговування АФАР.

6. Уперше розроблені метод і математичні моделі оптимізації технічного обслуговування одно рівнявою, дворівневої АФАР та групи АФАР, що дозволяє отримати вигоду від 15 % до 45% від оптимізації за критерієм мінімуму математичного очікування питомих експлуатаційних витрат.

7. Уперше розроблені методи реалізації стратегії експлуатації і ТО АФАР РЛС. Розроблена структурна схема взаємозв'язку стратегій експлуатації та ТО АФАР. Використання запропонованих методів при реалізації стратегій експлуатації та ТО дозволить отримати економію експлуатаційних витрат в розмірі 15–25 % на етапі післягарантійного обслуговування АФАР РЛС, за рахунок прогнозування відмов каналів і модулів АФАР і своєчасного виконання.

8. Удосконалені та досліджені математичні моделі надійності типових структур АФАР, що не обслуговуються, при різних розподілах відмов приймально-передавальних каналів, які враховують раптові і поступові відмови каналів. Це дозволяє збільшити оцінку середнього наробітку до відмови АФАР, яка не потребує постійного обслуговування, від 30 % до 150 %.

9. Доопрацьований та дістав подальшого розвитку метод визначення необхідної кількості запасних частин для забезпечення призначеного ресурсу і строку служби АФАР в частині обліку різних законів розподілу відмов каналів і модулів АФАР, який дозволив отримати від 20 % до 50 % економії експлуатаційних витрат на придбанні потрібної кількості запасних частин.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Статті в закордонних наукових журналах*

1. Костановский В. В. Математическая модель расчета надежности невозстанавливаемых фазированных антенных решеток. *Измерительная техника, Москва*. № 1, 2014. С. 56–59.

2. Kostanovskii V. V. A mathematical model for calculating the reliability of non-reducible phased antenna arrays, *Measurement Techniques, Moscow*. № 1, 2014, T. 57. P. 87–90. (*Журнал включено до НМБД SCOPUS*).

*Статті у наукових фахових виданнях*

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

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

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

5. 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.

6. Костановский В. В. Синтез структуры корабельных навигационных комплексов по критерию надежности на ранних стадиях проектирования. *Науковий журнал «Системи управління, навігації та зв'язку» ЦНДІ НіУ*. 2008, випуск 2(6). С. 3–9.

7. Мачалин И. А., Костановский В. В. Векторное и матричное диагностирование систем телекоммуникаций и защиты информации. *Науково-практичний журнал «Захист інформації»*, НАУ. № 2, 2012. С. 1–10.

8. Костановський В. В. Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, які враховують раптові та поступові відмови модулів надвисоких частот. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем НАН України «Математичні машини і моделі»*. № 2, 2014. С. 142–150.

9. Костановський В. В. Оптимізування технічного обслуговування фазованих антенних решіток. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем НАН України «Математичні машини і системи»*. 2015, № 1. С. 164–168

10. 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.

11. 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.

12. Костановский В. В., Козачук О. Д. Оптимизация технического обслуживания группы из нескольких фазированных антенных решеток антенного поста РЛС при диффузионном немонотонном и экспоненциальном распределениях времени безотказной работы каналов решетки. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем НАН України «Математичні машини і системи»*. 2017, № 1. С. 122–127.

13. 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.

14. Костановський В. В. Визначення області існування показників надійності в залежності від допустимих значень показників ефективності активної фазованій антенної решітки. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем НАН України «Математичні машини і системи».* № 4, 2019. С. 154–164.

15. Костановський В. В. Методика визначення кількості запасних модулів для забезпечення експлуатації активних фазованих антенних решіток за фактичним станом. *Сборник наукових праць «Новітні технології»,* 2019, вып. 3 (10). С. 101–109.

16. 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.* Том 45, № 1, 2020. С. 1–10.

17. Костановський В. В., Козачук О. Д., Мачалин І. А. Математична модель надійності приймально-передавальної АФАР в приймальному режимі за критерієм допустимого погіршення рівня бокових пелюсток. *Науковий журнал «Наукоємні технології», НАУ.* Том 47, № 3, 2020. С. 276–286.

18. Костановський В. В., Мачалин І. А. Разработка и исследование универсальной модели надежности активной фазированной антенной решетки РЛС. *Збірник наукових праць «Водний транспорт», ДУИТ.* 2020, вып. № 1 (29). С. 31–45.

19. Костановський В. В. Дослідження залежності показників надійності АФАР РЛС від температури активної зони кристала GaN транзисторів. *Науковий журнал «Наукоємні технології», НАУ.* Том 42, 2019, № 2. С. 254–261.

20. Костановський В. В., Мачалін І. А., Козачук О. Д. Взаємозв'язок стратегій експлуатації та технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій. *Науковий журнал «Радіотехніка», м. Харків.* 2020, № 4. С. 245–254.

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

22. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л., Богдан А. В., Крупник В. М., Крупник Л. В., Писаренко В. Г., Костановський В. В. Инновационные технологии многоцветовой термометрии. *Науковий журнал «Вимірювання техніка та метрологія.* 2012. Вип. 73. С. 45–51.

23. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л., Богдан А. В., Крупник В. М., Крупник Л. В., Писаренко В. Г., Костановський В. В. Новые технологии

многоцветового бесконтактного и световодного термоконтроля металлических сплавов / *Науковий журнал «Металл и литье України»* 2012. № 9. С. 29–35.

24. Костановський В. В. Математична модель оптимізації профілактичного обслуговування передавальних активних фазованих антенних решіток багатofункціональної РЛС. *Збірник наукових праць «Новітні технології»*. 2020, Вип. 1(11). С. 4–13.

#### *Матеріали конференцій*

25. Костановский В. В., Баглай Г. Р. Планирование обработки показателей надежности в процессе создания артиллерийского вооружения. *Збірник праць 3-ої Міжнародної конференції «Артилерійські ствольні системи, боєприпаси, засоби артилерійської розвідки та керування вогнем»*, 5–7 жовтня 1999 г., Київ, КБ НТЦ АСО, ДК «Укрспецекспорт». С. 222–233.

26. Костановский 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.

27. Козачук О. Д., Костановский 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.

28. 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.

29. 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 р., м. Київ, Україна. С. 63–64.

30. Костановский В. В. Построение номограмм для определения показателей надежности распределенных структур ФАР РЛС при различных законах распределения наработки до отказа СВЧ модулей. *Матеріали Міжнародної наукової конференції*, 16–17 жовтня 2013 року

«Статистичні методи обробки сигналів і даних», НАУ. Інститут аеронавігації, 2013. С. 123–127.

31. Козачук О. Д., Костановский 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.*

32. Костановський В. В. Оптимизация технического обслуживания фазированных антенных решеток. – *Збірник тез доповідей науково-технічної конференції 17–19 листопада 2014 року «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку навігації, спостереження та організації повітряного руху GNS/АТМ», Державне космічне агентство України, Укр. Аеро. Рух., НАУ, Інститут аеронавігації. С. 63–68.*

#### *Стандарти*

33. Стандарт підприємства. СТП ФІЯЕ.0022:2010. «Надійність. Програма забезпечення надійності виробу на стадіях розроблення» – На заміну РДП ЛТИШ.0107-89 – Впроваджений у ДП «НДІ «Квант» з 01.01.2011 р. – Керівник розробки стандарту Костановський В. В.

34. Стандарт підприємства. СТП ФІЯЕ.0022:2010. «Надійність. Вимоги до кількісних показників надійності, які входять в проекти ТТЗ (ТЗ) на розроблення в ТУ на виготовлення виробів» – На заміну СТП ГК-0.21-86, СТП ГК-0.122-86 – Впроваджений на ДП «НДІ «Квант» з 01.01.2011 р. – Керівник розробки стандарту Костановський В. В.

35. Стандарт підприємства. СТП ФІЯЕ.0023:2010. «Надійність. Розрахунок надійності модулів, блоків, приладів і виробів на основі вітчизняних та іноземних джерел інформації про надійність електрорадіовиробів» – На заміну РДП ЛТИШ.902-79, СТП ГК-905-82 – Впроваджений у ДП «НДІ «Квант» з 01.07.2011 р. – Керівник розробки стандарту Костановський В. В.

36. Стандарт підприємства. СТП ФІЯЕ.0024:2010 «Надійність. Вироби основного виробництва. Збір, облік, аналізування, оброблення та реалізація інформації про надійність у процесі приймально-здавальних, періодичних, попередніх, міжвідомчих і державних випробувань» – На заміну СТП ГК-0.102-83, СТП ГК-0.103-83, СТП ГК-0.104.83, СТП ГК-0.105-83, СТП ГК-0.106-83 – Впроваджений у ДП «НДІ «Квант» з 01.01.2011 р. – Керівник розробки стандарту Костановський В. В.

*Пояснювальні записки до концептуальних, ескізних і технічного проєктів*

37. Пояснювальна записка до технічного проєкту РЛС «Фенікс», у рамках ДКР «Простір-Ф» – ДП «НДІ «Квант», номер державної реєстрації

РК0108U000066Т, 2012 р. – Головний конструктор Демченко О. В., співвиконавець Костановський В. В.

38. Пояснювальна записка до концептуального проекту «Пересувного радіолокаційного посту (ПРП) багатофункціональної станції супроводу і наведення (БССН) малої дальності (МД) зенітного ракетного комплексу (ЗРК)» – ДП «НДІ «Квант», децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р. – Головний конструктор Демченко О. В., співвиконавець Костановський В. В.

39. Пояснювальна записка до концептуального проекту «Пересувного радіолокаційного посту (ПРП) багатофункціональної станції супроводу і наведення (МССН) середньої дальності (СД) зенітного ракетного комплексу (ЗРК)» – ДП «НДІ «Квант», децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р. – Головний конструктор Демченко О. В., співвиконавець Костановський В. В.

40. Пояснювальна записка до ескізного проекту «Пересувного радіолокаційного посту (ПРП) багатофункціональної станції супроводу і наведення малої дальності зенітного ракетного комплексу» – ДП «НДІ «Квант-Радіолокація», децимальний номер ZRS KRL ANL 001 06 2017 р. – Головний конструктор Гузь В. І., співвиконавець Костановський В. В.

41. Пояснювальна записка до ескізного проекту «Пересувного радіолокаційного посту (ПРП) багатофункціональної станції супроводу і наведення середньої дальності зенітного ракетного комплексу» – ДП «НДІ «Квант-Радіолокація», децимальний номер ZRS KRL ANL 001 07 2017 р. – Головний конструктор Гузь В. І., співвиконавець Костановський В. В.

## АНОТАЦІЯ

**Костановський В. В. Методологія підвищення ефективності технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Робота присвячена розвитку методології підвищення ефективності технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток (АФАР) радіолокаційних станцій. У даній роботі розроблені та удосконалені математичні моделі надійності і підвищення ефективності експлуатації активних фазованих антенних решіток за критеріями технічного використання і економічної ефективності.

В роботі удосконалені математичні моделі надійності електровиробів, що описують раптові і поступові відмови. Розроблені та досліджені моделі надійності необслугованих АФАР зі  $k$  – рівневою структурною схемою надійності при раптових і поступових відмовах модулів антенних решіток. Облік поступових відмов модулів антенних решіток дозволяє підвищити надійність АФАР від 30 % до 80 %. Розроблені математичні моделі



надійності обслуговуваних АФАР. Удосконалені методи визначення потрібної кількості запасних модулів антенних решіток для забезпечення технічного обслуговування АФАР.

Розроблені та досліджені моделі оптимального технічного обслуговування РЛС з АФАР, застосування яких дозволяє знизити від 15 % до 35 % наведених експлуатаційних витрат на етапі гарантійного обслуговування. Визначені стратегії технічного обслуговування і експлуатації АФАР РЛС з наробітку і фактичному стану, розроблені моделі і методи для реалізації цих стратегій на етапі післягарантійного обслуговування.

**Ключові слова:** методологія, математичні моделі, методи, алгоритми, антенна фазована активна решітка, надійність, відмови, технічне обслуговування, експлуатація, імовірність, розподіл

### АННОТАЦИЯ

**Костановский В. В. Методология повышения эффективности технического обслуживания активных фазированных антенных решеток радиолокационных станций.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

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

Работа посвящена развитию методологии повышения эффективности технического обслуживания активных фазированных антенных решеток (АФАР) радиолокационных станций. В данной работе разработаны и усовершенствованы математические модели надежности и повышения эффективности эксплуатации активных фазированных антенных решеток по критериям технического использования и экономической эффективности. В работе усовершенствованные математические модели надежности электроизделий, описывающих внезапные и постепенные отказы. Разработаны и исследованы модели надежности необслуживаемых АФАР с  $k$  – уровневой структурной схеме надежности при внезапных и постепенных отказах модулей антенных решеток. Учет постепенных отказов модулей антенных решеток позволяет повысить надежность АФАР от 30 % до 80 %. Разработанные математические модели надежности обслуживаемых АФАР. Усовершенствованные методы определения потребности количеству запасных модулей антенных решеток для обеспечения технического обслуживания АФАР.

Разработаны и исследованы модели оптимального технического обслуживания РЛС с АФАР, применение которых позволяет снизить от 15 % до 35 % приведенных эксплуатационных затрат на этапе гарантийного обслуживания. Определены стратегии технического обслуживания и

эксплуатации АФАР РЛС с наработки и фактическому состоянию, разработанные модели и методы для реализации этих стратегий на этапе послегарантийного обслуживания.

**Ключевые слова:** методология, математические модели, методы, алгоритмы, антенна фазированная активная решетка, надежность, отказы, техническое обслуживание, эксплуатация, вероятность, распределение.

## ANNOTATION

**Kostanovskyi V. V. Methodology for improving the efficiency of maintenance of active phased antenna arrays of multifunctional radar stations.** – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.20 "Operation and repair of vehicles". National Aviation University, Kiev, 2021.

The work is devoted to the development of the methodology for improving the efficiency of maintenance of active phased array antennas (APAA) of radar stations. In this paper, mathematical models of reliability and efficiency of operation of active phased array antennas according to the criteria of technical use and economic efficiency are developed and improved.

Mathematical models of reliability of electrical products describing sudden and gradual failures are improved in the work. Reliability models of maintenance – free APAA with  $k$  – level structural scheme of reliability at sudden and gradual failures of antenna array modules are developed and investigated. Accounting for gradual failures of antenna array modules can increase the reliability of APAA from 30 % to 80 %. Mathematical models of reliability of serviced APAA are developed. Improved methods for determining the required number of spare antenna array modules to provide APAA maintenance.

Developed and researched models of optimal maintenance of radars with APAA, the use of which allows to reduce from 15 % to 35 % of the operating costs at the stage of warranty service. Strategies for maintenance and operation of APAA radar based on operating time and actual condition are determined, models and methods for implementation of these strategies at the stage of post-warranty service are developed.

**Keywords:** methodology, mathematical models, methods, algorithms, antenna phased active grating, reliability, reprimands, maintenance, operation, probability, distribution.

Підп. до друку 01.04.2021. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 2,32. Обл.-вид. арк. 2,5.  
Тираж 10 пр. Замовлення № 57-1.

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