

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Костановський Валерій Вікторович

УДК 623.6-523.8:623.4.017

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

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело

_____ В.В. Костановський

Науковий консультант: Мачалін Ігор Олексійович, докт. техн. наук,
професор

Київ – 2021

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.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми розвитку розробки моделей і методів підвищення ефективності технічного обслуговування (ТО) активних фазованих антенних решіток (АФАР) радіолокаційних станцій (РЛС) з урахуванням особливостей їх використання в складних умовах експлуатації.

Прискорення в останній час розвитку АФАР викликано їх швидким впровадженням в радіоелектронні системи управління озброєнням. Наявність АФАР не тільки підвищує ефективність систем озброєння, але і в значній мірі визначає експортний потенціал країн, що беруть участь в міжнародній торгівлі озброєнням. Так, наприклад, РЛС сучасних винищувачів провідних промислових країн оснащені АФАР, від характеристик яких багато в чому залежать функціональні можливості літаків і висновок багатомільярдних контрактів на їх продаж.

АФАР радіоелектронних систем - не тільки технологічно складні, але і дуже затратні споруди. Тому останнім часом однією з головних тенденцій стають пошуки шляхів зниження їх вартості за рахунок спрощення методів конструювання і використання комерційних технологій. Вже з'явилися пропозиції про створення недорогих РЛС з АФАР, що вирішують завдання метеоспостережень, управління повітряним рухом, стеження за безпілотними об'єктами тощо.

З огляду на високу вартість створення і експлуатації радіоелектронних систем з АФАР актуальною і надзвичайно важливою є вирішення проблеми розробки методології підвищення ефективності ТО АФАР РЛС.

У першому розділі проведений короткий аналіз характеристик надійності діючих і розроблюваних військових РЛС з фазованими антенними решітками. Буде визначено основні причини відмов надвисокочастотних (НВЧ) випромінюючих передавальних каналів і модулів вторинного електроживлення. Проаналізовано застосування в практиці розробки АФАР методів розрахунку показників надійності. Розглянуто практичні методи ТО і особливості експлуатації зарубіжних і вітчизняних РЛС.

У другому розділі розглянуто завдання системного аналізу надійності електронних модулів при раптових і поступових відмовах електрорадіовиробів (ЕРВ) з використанням експоненціального розподілу, розподілу Вейбулла, дифузійного немонотонного розподілу і композиції розподілів.

В третьому розділі представлена коротка характеристика досліджуваної в дисертації АФАР РЛС, визначені критерії відмов і структурні схеми надійності, розроблений метод побудови математичних моделей надійності АФАР з структурною схемою будь-якого k - рівня складності, що не обслуговуються, з використанням теорії ізотропних ієрархічних систем. Представлені математичні моделі надійності приймально-передавальної АФАР за критерієм допустимого зниження кількості випромінюючих каналів, за критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС та за критерієм допустимого погіршення рівня бокових пелюсток аналогової і аналого-цифрової АФАР. Виконана перевірка адекватності моделі надійності надлишкової структури АФАР, що не обслуговуються, в порівнянні з класичною моделлю надійності резервованої невідновлювальної структури з навантаженим ковзаючим резервом.

В четвертому розділі визначені області існування показників надійності АФАР в залежності від граничних значень показників ефективності. Досліджувані математичні моделі надійності каналів і модулів, математичні моделі надійності антенної фазованої підрешітки та математична модель надійності приймально-передавальної АФАР за різними законами розподілу відмов приймально-передавальних каналів.

Розроблений метод визначення необхідної кількості запасних каналів та модулів АФАР на термін служби за різними законами розподілу відмов.

У п'ятому розділі розроблені математичні моделі надійності АФАР, що обслуговуються, які можуть використовуватися при розробленні і експлуатації великих РЛС з АФАР. Також визначена потрібна кількість запасних приймально-передавальних (ППК) каналів при проведенні ТО АФАР.

У шостому розділі розроблені математичні моделі оптимізації ТО зі однорівневої і дворівневої схемами надійності, а також групи АФАР, що розміщені у одному антенному посту РЛС. Виконана розробка методів реалізації стратегій експлуатації та проведення ТО АФАР РЛС.

Сьомий розділ присвячений розробці методів і практичних рекомендацій щодо підвищення надійності та ефективності експлуатації АФАР РЛС. Складені практичні рекомендації щодо визначення вимог до показників надійності і експлуатації в технічному завданні та розроблення програм забезпечення надійності під час розробки РЛС з АФАР. Складені практичні рекомендації щодо застосування моделі оптимального ТО і реалізації стратегій експлуатації і ТО АФАР РЛС.

Наукова новизна одержаних результатів:

- 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;

- уперше розроблені та досліджені математичні моделі надійності АФАР, що не обслуговуються, зі структурною схемою надійності k - рівня складності за критерієм допустимого зниження рівня працездатних випромінюючих НВЧ каналів антенної решітки які можуть використовуватися під час проектування передавальних і приймально-передавальних РЛС та виконана перевірка на адекватність розробленої моделі надійності АФАР;

- уперше розроблена математична модель надійності АФАР за критерієм допустимого зменшення максимальної дальності радіолокатора яка може використовуватися під час проектування приймально-передавальних РЛС;

- уперше розроблені математичні моделі надійності АФАР за критерієм допустимого погіршення рівня бокових пелюсток для аналогової і аналого-цифрової АФАР які можуть використовуватися під час проектування приймальних і приймально-передавальних РЛС;

- уперше розроблені математичні моделі надійності АФАР, які обслуговуються, що можуть використовуватися при експлуатації і ТО великих РЛС з постійним обслуговуючим персоналом;

- уперше розроблені метод і математичні моделі оптимізації ТО однорівневої, дворівневої АФАР та групи АФАР, що дозволяють отримати значний вигравш від оптимізації за критерієм мінімуму математичного очікування питомих експлуатаційних витрат;

- 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.

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 обслуговуються.

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 показав, що потрібна кількість запасних каналів і модулів є однаковим для всіх типів закону розподілу.

Підтвердженням достовірності наукових досліджень є збіг результатів теоретичних та експериментальних досліджень, а також успішна реалізація результатів роботи на промислових підприємствах України. Виконана робота відповідає паспорту спеціальності "05.22.20 - експлуатація та ремонт засобів транспорту".

Практичне значення одержаних результатів.

Широке використання розробленої методології в процесі експлуатації РЛС з АФАР буде сприяти підвищенню ефективності і зниженню експлуатаційних витрат. Розроблені в дисертації наукові положення і результати можуть бути використані для створення нових методів організації ТО РЛС з АФАР.

Ключові слова: активна фазована антенна решітка, експлуатація РЛС, надійність, математичні моделі, алгоритми технічного обслуговування, експлуатаційні витрати, класифікація.

ANNOTATION

Kostanovskiy V.V. Methodology for improving the efficiency of technical service of active phase arrays of radio locating stations - Qualifikatsiyna naukova pratsya as a manuscript.

Dissertations on the scientific level of the Doctor of Technical Sciences for the specialty 05.22.20 "Operation and repair of vehicles." - National Aviation University, Kyiv, 2020.

The dissertation is assigned to the topical scientific problem of the development of the development of models and methods of improving the efficiency of technical service (TS) of active phase antenna arrays (APAA) of radio locating stations.

At the end of the day, the development of APAA has been accelerated to a wide range of services in electronic systems and management of installations. The availability of the APAA is not only an increase in the efficiency of the systems of protection, but in the meaning of the world the export potential of the country, but also to take part in the international trade of the environment. So, for example, the radar stations of the modern provinces of the provincial industrial regions are equipped with APAA, due to the characteristics of which there is a lot of functionality in terms of the functionality of the list and the new APAA of electronic systems is not only technologically folding, but even more costly. That will remain for an hour, one of the main tendencies, there are jokes about the lowering of the costs for the development of the simplified methods of design and development of commercial technologies. Proposals have already appeared about the establishment of inexpensive radar stations with APAA, how to check the weather alert, control the crash, work for the easy-to-use objects, etc.

I will look at the top of the line and operation of electronic systems with APAA topical and highly important ϵ expanding the problem of developing the methodology for improving the effectiveness of TS APAA radar.

The first section provides a brief analysis of the characteristics of reliability and efficiency of existing and developed military radars with phased array antennas. The main reasons for failures of ultrahigh-frequency (UHF) radiating transmission channels and secondary power supply modules will be determined. The application of methods of calculation of reliability indicators in the practice of APAA development is analyzed. Practical methods of TS and features of operation of foreign and domestic radars are considered.

The second section considers the problem of system analysis of the reliability of electronic modules in case of sudden and gradual failures of electrical and radio

products (ERV) using exponential distribution, Weibull distribution, diffusion non-monotone distribution and distribution composition. Another has seen the establishment of an imaging analysis of the reliability of the electronic modules in the case of rapid and in-progress indications of the electro radio products (ERP) with the validity of the exponential rose, the unproblematic component.

In the third section, a short description of the early warning in the dissertation of the APAA radar is presented, the meaning of the criteria for the views and structural diagrams of reliability, the breakdown of the method of stimulating mathematical models of the reliability of the unserviceable ones in the structural scheme of the folding system. The presented mathematical models of the reliability of the reception-transmitting APAA for the criterion of the permissible decrease in the number of high-performance channels, for the criterion of the permissible decrease in the maximum range of the radar and the criterion of the permissible loss of the analogue of the analogue of the analogue of the side lights. The adequacy of the model of reliability of the redundant structure of unmaintained APAA in comparison with the classical model of reliability of the reserved non-renewable structure with the loaded sliding reserve is performed.

In the fourth division of the region, there is an increase in the indicators of the APAA reliability in the presence of the boundary values of the efficiency indicators. Previous mathematical models of the reliability of the channels and modules, the mathematical models of the reliability of the antenna phase array, and the mathematical model of the reliability of the receiving and transmitting AFAR according to the new laws of the development of the signals of the receiving channel and transmitting.

Splitting the method of assigning the necessary number of spare channels and modules of the APAA for the term of service according to the new laws of distribution of messages.

In the fifth part of the breakdown of the mathematical model of the reliability of the APAA, which service is provided, which can be victorious during the

development and operation of the great radars with the APAA. Also, the number of spare receive-transmitting (RTC) channels is required for the APAA TS.

In the sixth section mathematical models of optimization of TS with one-level and two-level schemes of reliability, and also APAA groups which are placed in one antenna post of a radar are developed. The development of methods for the implementation of strategies for the operation and maintenance of APAA radar.

Some of the assignments of rooting methods and practical recommendations for improving the reliability and efficiency of the operation of the APAA radar. Storage of practical recommendations for the purpose of making sure that there is an indication of the reliability and operation in the technical establishment and the development of the program for the safety of the radar station from APAA. Storage of practical recommendations for storing models of optimal maintenance and implementation of strategies for operation and maintenance of APAA radar.

Scientific novelty of the obtained results:

- for the first time the criteria of failures are defined and the method of construction of mathematical models of reliability of unattended APAA with the structural scheme of any k - level of complexity which unlike known use the theory of isotropic hierarchical systems is developed;

- for the first time developed and researched mathematical models of APAA reliability that are not serviced, with a structural scheme of reliability k - the level of complexity by the criterion of allowable reduction of the working microwave emitting channels of the antenna array that can be used during the design of transmitting and receiving developed APAA reliability model;

- for the first time a mathematical model of APAA reliability was developed according to the criterion of permissible reduction of the maximum range of the locator which can be used during the design of transceiver radars;

- for the first time mathematical models of reliability of APAA on criterion of admissible deterioration of level of lateral petals for analog and analog-digital

APAA which can be used during designing of receiving and receiving-transmitting radars are developed;

- for the first time mathematical models of APAA reliability are developed, which are serviced, which can be used during operation and maintenance of large radars with permanent maintenance personnel;

- for the first time the method and mathematical models of optimization of maintenance of one-level, two-level APAA and APAA group were developed, which allows to get a significant benefit from optimization by the criterion of minimum mathematical expectation of specific operating costs;

- for the first time developed methods for implementing the strategy of operation and maintenance of APAA radar. The structural scheme of interrelation of strategies of operation and TS APAA is developed. The use of the proposed methods in the implementation of strategies of operation and maintenance will save operating costs of 15% - 25% at the stage of post-warranty service APAA radar, by predicting failures of channels and modules APAA and timely execution.

Improved and researched mathematical models of reliability of typical APAA structures that are not serviced, according to different distributions of failures of receiving and transmitting channels, which take into account sudden and gradual failures of channels. This allowed to significantly increase the assessment of the average earnings before the failure of unserved APAA.

The method of determining the required number of spare parts to ensure the designated resource and service life of APAA in terms of accounting for different laws of distribution of failures of channels and modules APAA, which showed that the required number of spare channels and modules is the same for all types of distribution law.

Confirmation of the reliability of scientific research is the coincidence of the results of theoretical and experimental research, as well as the successful implementation of the results of work at industrial enterprises of Ukraine. The work

performed corresponds to the passport of the specialty "05.22.20 - operation and repair of vehicles".

The practical significance of the obtained results.

Extensive use of the developed methodology in the operation of radars with APAA will help increase efficiency and reduce operating costs. The scientific provisions and results developed in the dissertation can be used to create new methods of organization of radar maintenance with APAA.

Keywords: active phased array antenna, radar operation, reliability, mathematical models, maintenance algorithms, operating costs, classification.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті в закордонних наукових журналах

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

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

Статті у наукових фахових виданнях

2. 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. Р. 32-38 (Журнал включено до НМБД **SCOPUS**)

3. Kostanovskyi 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. Р. 31-40. (Журнал включено до НМБД **SCOPUS**)

4. 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.

5. 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.

6. 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.

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

8. 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

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

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

15. 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.

16. Костановський В.В., Козачук О.Д., Мачалін І.О. 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.

17. Костановский В.В., Мачалин И.А. Разработка и исследование универсальной модели надежности активной фазированной антенной решетки РЛС. *Збірник наукових праць «Водний транспорт», ДУІТ*. 2020, вип. №1 (29). С. 31- 45.

18. 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.

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

20. Козачук О.Д. , Костановський В.В, Мачалін І.О., Терентьєва І. Є. Розробка методу та визначення вимог до показників надійності каналів і модулів активної фазованої антенної решітки - *Науковий журнал «Наукоємні технології» НАУ*. Том 48, №4, 2020. С. 439-442.
21. Жуков Л.Ф, Корниенко А.Л., Богдан А.В., Крупник В.М., Крупник Л.В., Писаренко В. Г, Костановский В. В. Инновационные технологии многоцветовой термометрии. *Науковий журнал «Вимірювання техніка та метрологія*. 2012. Вип. 73. С. 45-51.
22. Жуков Л. Ф. , Корниенко А. Л. , Богдан А. В., Крупник В. М., Крупник Л.В., Писаренко В.Г., Костановский В.В. Новые технологии многоцветового бесконтактного и световодного термоконтроля металлических сплавов / *Науковий журнал «Металл и литье Украины»* 2012. № 9. С. 29-35.
23. Костановський В.В., Математична модель оптимізації профілактичного обслуговування передавальних активних фазованих антенних решіток багатофункціональної РЛС. *Збірник наукових праць «Новітні технології»*. 2020, Випуск 1(11). С. 4-13.

Матеріали конференцій

24. Костановский В.В., Баглай Г.Р. Планирование отработки 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.
25. 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 ОВТ ЗСУ, м. Київ*. С. 153-154.

26. 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 ОВТ ЗСУ, м. Київ.* С. 228-229.

27. 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.

28. 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 и перспективи», НТУ «Київський політехнічний інститут». Приладобудівний факультет, 23-24 квітня 2013 р., м. Київ, Україна.* С. 63-64.

29. 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.

30. 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.

31. 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/ATM»*, Державне космічне агентство України, Укр. Аеро. Рух., НАУ, Інститут аеронавігації. С. 63- 68.

Стандарти

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

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

34. 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.

35. 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 проектів

36. Пояснювальна записка до технічного проекту 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.

37. 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.

38. 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.

39. 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.

40. 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	.28
ВСТУП.....	.33
<p style="margin: 0;">РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</p>	
1.1 Загальні положення.....	44
1.2. Класифікація і схеми побудови фазованих антенних решіток.....	45
1.3 Приймально-передавальні модулі активних фазованих антенних решіток.....	47
1.4 Системи вторинного електроживлення активних фазованих антенних решіток.....	48
1.5 Коротка характеристика надійності радіолокаційних станцій з фазованими антенними решітками.....	51
1.6 Короткий огляд методів оцінки надійності радіолокаційних станцій з активними фазованими антенними решітками.....	56
1.6.1 Класифікація показників надійності радіолокаційних станцій з активними фазованими антенними решітками.....	56
1.6.2 Механізми і види відмов модулів надвисоких частот і модулів вторинного живлення активних фазированих антенних решіток.....	57
1.6.3 Короткий аналіз методів оцінки надійності активних фазованих антенних решіток.....	58
1.7 Короткий аналіз показників надійності вітчизняної та імпортової елементної бази апаратури радіоелектронних систем.....	61
1.7.1 Загальні положення.....	61

1.7.2 Загальна характеристика стандартів та довідникових посібників щодо прогнозування надійності електрорадіовиробів, що застосовуються у світовій практиці.....	62
1.7.3 Міжнародний стандарт IEC TR 62380 Ed.1.....	71
1.7.4 Автоматизація розрахунків надійності апаратури.....	72
1.7.5 Експериментальна оцінка інтенсивностей відмов електрорадіовиробів за результатами прискорених випробувань.....	73
1.7.6 Визначення експериментальної інтенсивності відмов.....	76
1.7.7 Оцінка надійності конденсаторів при прискорених випробуваннях.....	76
1.7.8 Оцінка рівня надійності елементної бази.....	77
1.8 Короткий аналіз наукових робіт з моделей експлуатації та технічного обслуговування складних систем.....	78
1.8.1 Загальні положення.....	78
1.8.2 Основні стратегії та завдання технічного обслуговування і ремонту технічних об'єктів.....	79
1.8.3 Огляд робіт за моделями оптимального технічного обслуговування систем і обслуговування за фактичним станом.....	85
1.9 Короткий огляд методів технічного обслуговування радіолокаційних станцій.....	87
1.9.1 Основні завдання технічної експлуатації радіолокаційних станцій.....	87
1.9.2 Характеристика системи технічного обслуговування та ремонту радіолокаційних станцій.....	87
1.10 Постановка завдань дослідження	91

РОЗДІЛ 2. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК У ПРОЦЕСІ ПРОЕКТУВАННЯ.....	97
---	----

2.1 Постановка завдань.....	97
2.2 Завдання, які вирішуються в процесі системного аналізу надійності електронних модулів.....	97
2.3 Системний аналіз безвідмовності і довговічності електронного модуля	98
2.4 Приклад системного аналізу безвідмовності і довговічності електронного модуля.....	100
2.5 Висновки до другого розділу.....	105

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАДІЙНОСТІ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ, ЩО НЕ ОБСЛУГОВУЮТЬСЯ.....

3.1 Постановка завдань.....	108
3.2 Коротка характеристика приймально-передавальних активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій, які досліджуються у дисертаційній роботі.....	108
3.2.1 Приймально-передавальна активна фазована антенна решітка, яка досліджується в дисертаційній роботі	109
3.2.2 Апертура активної фазованої антенної решітки.....	110
3.2.3 Апертура підрешіток.....	110
3.2.4 Форма апертури активних фазованих антенних решіток і вимоги до діаграм спрямованості.....	110
3.3 Визначення критеріїв відмов приймально-передавальних активних фазованих антенних решіток.....	112
3.3.1 Загальні положення.....	112
3.3.2 Максимальна дальність дії радіолокатора.....	113
3.3.3 Рівень бічних пелюсток активних фазованих антенних решіток	114

3.3.4	Формулювання критеріїв відмов активних фазованих антенних решіток.....	116
3.4	Структурні схеми надійності приймально-передавальних активних фазованих антенних решіток.....	117
3.5	Розроблення математичної моделі надійності активної фазированної антенної решітки, що не обслуговується, за критерієм допустимого зниження кількості приймально-передавальних каналів.....	119
3.5.1	Загальні положення.....	119
3.5.2	Побудова математичної моделі надійності активної фазованої антенної решітки, що не обслуговується, з k - рівневою структурною схемою надійності.....	120
3.6	Розроблення математичної моделі надійності активної фазованої антенної решітки, що не обслуговується, за критерієм допустимого рівня зниження максимальної дальності радіолокаційної станції	128
3.6.1	Класичне рівняння дальності радіолокації.....	128
3.6.2	Виведення формули для середнього наробітку до відмови активних фазованих антенних решіток.....	129
3.6.3	Виведення формули для визначення імовірності безвідмовної роботи активної фазованої антенної решітки.....	138
3.7	Розроблення математичної моделі надійності активної фазованої антенної решітки, що не обслуговується, в приймальному режимі за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток.....	142
3.7.1	Загальні положення.....	142
3.7.2	Критерій відмови аналогової активної фазованої антенної решітки у режимі прийому.....	142
3.7.3	Побудова математичної моделі надійності аналогової активної фазованої антенної решітки у режимі прийому.....	143
3.7.4	Побудова математичної моделі надійності аналогово-цифрової	

активної фазованої антенної решітки у режимі прийому.....	151
3.8 Доказ адекватності математичної моделі розрахунку надійності активної фазованої антенної решітки, що не обслуговується, по відношенню до класичної моделі розрахунку надійності резервованої невідновлювальної структури з навантаженим ковзаючим резервом.....	153
3.8.1 Загальні положення.....	153
3.8.2 Нова математична модель для розрахунку надійності невідновлювальної активної фазованої антенної решітки з однорівневою структурною схемою надійності.....	154
3.8.3 Перевірка адекватності математичної моделі надійності активної фазованої антенної решітки з однорівневою структурною схемою надійності.....	155
3.8.4 Перевірка адекватності математичної моделі надійності активної фазованої антенної решітки з k - рівневою структурною схемою надійності.....	158
3.9 Висновки до третього розділу.....	159
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАДІЙНОСТІ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ ЗА ДОВІЛЬНИМИ РОЗПОДІЛАМИ ВІДМОВ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНИХ КАНАЛІВ.....	163
4.1 Постановка завдань	163
4.2. Прогнозування технічного стану активних фазованих антенних решіток у процесі експлуатації.....	163
4.3. Перелік завдань, які вирішуються в процесі системного аналізу надійності активних фазованих антенних решіток.....	169

4.4 Системний аналіз моделей надійності активних фазованих антенних решіток з раптовими та поступовими відмовами модулів надвисокої частоти.....	170
4.5 Аналіз надійності різних структур приймальних та передавальних активних фазованих антенних решіток.....	175
4.6 Метод визначення необхідної кількості запасних каналів і модулів активних фазованих антенних решіток за різними законами розподілу відмов.....	186
4.7 Висновки до четвертого розділу.....	194

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАДІЙНОСТІ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ, ЩО ОБСЛУГОВУЮТЬСЯ.....197

5.1 Постановка завдань.....	197
5.2 Розроблення математичних моделей надійності активних фазованих антенних решіток з однорівневої структурною схемою надійності, що обслуговуються	197
5.3. Розроблення математичних моделей надійності активних фазованих антенних решіток з дворівневої структурною схемою надійності, що обслуговуються	201
5.4 Визначення необхідного значення середнього часу технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток для забезпечення потрібного значення коефіцієнта технічного використання.....	207
5.5 Визначення потрібної кількості запасних приймально-передавальних каналів при проведенні технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток.....	208
5.5 Висновки до п'ятого розділу.....	209

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, СТРАТЕГІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ І ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА НАРОБІТКОМ ТА ФАКТИЧНИМ СТАНОМ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ.....	212
6.1 Постановка завдань.....	212
6.2 Розроблення та дослідження математичної моделі оптимізації технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій.....	212
6.2.1. Загальні положення.....	212
6.2.2 Розроблення та дослідження математичної моделі оптимізації технічного обслуговування активної фазованої антенної решітки з однорівневою структурною схемою надійності.....	213
6.2.3 Розроблення та дослідження математичної моделі оптимізації технічного обслуговування активної фазованої антенної решітки з дворівневою структурною схемою надійності	220
6.3 Розроблення і дослідження математичної моделі оптимізації технічного обслуговування групи активних фазованих антенних решіток, розміщених в одному антенному посту радіолокаційної станції.....	228
6.3.1 Загальні положення	228
6.3.2 Побудова математичної моделі оптимізації групового технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток.....	229
6.4 Розроблення і дослідження методів реалізації стратегій експлуатації та проведення технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій.....	240
6.4.1. Взаємозв'язок стратегій експлуатації та технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій.....	240

6.4.2 Вибір математичних моделей надійності модулів антенної решітки і активних фазованих антенних решіток.....	245
6.4.3 Вибір методу обробки статистичної інформації про відмови модулів антенних підрешіток у процесі експлуатації.....	248
6.4.4 Розроблення метода визначення показників надійності і технічного обслуговування для стратегій експлуатації та технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток за наробітком і фактичним станом.....	250
6.5 Висновки до шостого розділу.....	252

РОЗДІЛ 7. МЕТОДИ І ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

7.1 Постановка завдань.....	255
7.2 Практичні рекомендації щодо визначення вимог до показників надійності та експлуатації під час розроблення радіолокаційних станцій з активними фазованими антенними решітками.....	255
7.2.1 Розробка технічного завдання на розроблення радіолокаційних станцій з активними фазованими антенними решітками	255
7.2.2 Визначення вимог щодо показників надійності, ефективності експлуатації і технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій.....	256
7.3 Рекомендації щодо розроблення «Програми забезпечення надійності радіолокаційних станцій з активними фазованими антенними решітками на стадії розробки».....	260
7.4 Практичні рекомендації щодо застосування моделі оптимального технічного обслуговування та реалізації стратегій експлуатації та технічного	

обслуговування за наробітком і станом активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій.....	270
7.5 Методичні вказівки та алгоритми реалізації стратегій експлуатації і технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій.....	271
7.6 Реалізація другої стратегії експлуатації і технічного обслуговування за станом з адитивним контролем показників надійності на прикладі передавальної активної фазованої антенної решітки.....	281
7.7 Висновки до сьомого розділу.....	285
ВИСНОВКИ.....	289
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	291
ДОДАТОК А. СПИСОК ОПУБЛІКУВАННЯ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	319
ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ....	326

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ФАР – фазована антенна решітка

АФАР - активна ФАР

ПФАР - пасивна ФАР

РЛС – радіолокаційна станція

НВЧ – надвисока частота

ТО - технічне обслуговування

ТО і Р - система технічного обслуговування і ремонту

ППМ - приймально-передавальний модуль

ППК - приймально-передавальний канал

МІС – монолітна інтегральна схема

ПРО - протиракетна оборона

ППО – протиповітряна оборона

ОВТ - озброєння і військова техніка

ТВД - театр військових дій

БР – балістична ракета

СПРЯУ - система попередження про ракетно-ядерний удар

ПЦ – повітряна ціль

РЕП – радіоелектронна протидія

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ВМР - верхня межа регулювання

ДС – діаграма спрямованості

ЕПР – ефективна площа розсіювання

РЧ - радіочастотна

ВПС – військово-повітряні сили

РЕБ – радіоелектронна безпека

ФА - функціональна апаратура

ДЖ – джерело живлення

ЗП – запасне майно і приладдя

ГСН – головка самонаведення

ПКР – протикорабельна ракета

ІК - інфрачервоний

ЗРС – зенітна ракетна система

ЗРК - зенітний ракетний комплекс

БСКЗ – багатофункційна система керування зброєю

ЗР - зенітна ракета

ЗКР – зенітна керована ракета

БІКС – бойова інформаційно-керуюча система

РЛВ – радіолокаційний відповідач

РПН – радіолокатор підсвітки і наведення

ВВВ – всевисотний виявитель

ПУ – пускова установка

ЛБХ – лампа біжучої хвилі

ЕРВ - електрорадіовироби

КОГ – коефіцієнт оперативної готовності

КГ – коефіцієнт готовності

КТВ – коефіцієнт технічного використання

ТО і Р – технічне обслуговування і ремонт

АТ – авіаційна техніка

ВМР – верхня межа регулювання

СТС – складна технічна система

ПЕВ – питомі експлуатаційні витрати

ЖЦ – життєвий цикл

ДС – ДС - перетворювач напруги

АРАА (АФАР) - active phase antenna arrays

DNR (ДНР) – дифузійний немонотонний розподіл

ER (EP) - експоненціальний розподіл

WR (WP) – розподіл Вейбулла

ЗПР - загальний показовий розподіл

ER×DNR – композиція ER і DNR

ER ×WR - композиція ER і WR

ER × NR - композиція ER і NR

ER/2×DNR/2 - композиція ER/2 і DNR/2, характеризує 50% раптових та 50% поступових відмов

ІБР – імовірність безвідмовної роботи

ТУ – технічні умови

СРО – система рідинного охолодження

МВЖ – модуль вторинного живлення

РБП (SLL – sidelobe level) – рівень бокових пелюсток

ППМП – приймально-передавальний модуль підрешітки

АППМ – антенний приймально-передавальний модуль

МССН – багатофункціональна станція супроводу і наведення

ПЗНр – програма забезпечення надійності виробу у процесі розроблення

НДІ - науково-дослідний інститут

FIT - інтенсивність відмов елемента, що відповідає одній відмові за 1000 000 000 год.

КД - конструкторська документація

ЕД - експлуатаційна документація

РКД - робоча конструкторська документація

ЗІП – О - комплект ЗІП одиночний

ЗІП –Г - комплект ЗІП- груповий

НАН України - Національна академія наук України

ТЗ - технічне завдання

ТТЗ – тактико-технічне завдання

ПЗ – пояснювальна записка

СЧ – складові частини

ГОСТ – державний стандарт Союзу Незалежних Держав

ДСТУ - державний стандарт України

MIL – військовий стандарт США

TAF – коефіцієнт прискорення за рахунок температури

VAF - коефіцієнт прискорення за рахунок напруги

AF – узагальнений коефіцієнт прискорення

МОУ – Міністерство оборони України

КБ – конструкторське бюро

ЕП – ескізний проект

ТП - технічний проект

ВСТУП

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. При цьому значні кошти вкладаються компаніями в розроблення нових надійних НВЧ-приладів на основі арсеніду і нітриду галію і підвищення надійності АФАР в цілому [18-20, 22-24, 142, 210].

Основні фірми і компанії розробники РЛС з ФАР в США:

- «Рейнхон» - розробник сімейства корабельних РЛС AN/SPY-1 та AN/SPY-6 для БСКЗ «Іджіс», РЛС ЗРК «Патріот» (Р-1, Р-3), наземної системи ТНААД тощо [142, 210, 212, 213, 216];

- «Нортроп-Грумман» - розробник наземної системи G/ATOR тощо [217];

- «Локхід-Мартін» - розробник наземної системи ТНААД тощо [216];

Основні організації розробники РЛС в Росії:

- концерн «Алмаз-Антей» - розробник систем С-300, С-400 [209, 214, 215];

- ВНДІ РЕ (ВНДІ «Альтаір») - розробник корабельної РЛС С-300Ф «Форт» [209];

- ФГУП «ВНДІ РТ» - розробник РЛС ЗРК «Панцир С1», «Редут», «Фурке», С-350 [210];

Основні організації розробники РЛС в Україні:

- ДП «НДІ «Квант-Радіолокація» - розробник морських РЛС «Позитив - ME1», «Позитив -ME2» [142, 210];

- КП НВК «Іскра» (Запоріжжя) (розробник наземної РЛС 80К6Т (80К6К1, 80К6М) [147];

- ДП «НДІ «Квант» - розробник корабельної РЛС «Марс-Пассат», морський РЛС «Фенікс-У» [211].

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 розроблення та подальше вдосконалення методології підвищення ефективності 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 показників експлуатаційної надійності і ефективності ТО складних систем [198-202, 211].

Концептуальний проект «Пересувного радіолокаційного посту багатофункціональної станції супроводу і наведення малої дальності зенітного ракетного комплексу» - децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р. [199].

Ескізний проект «Пересувного радіолокаційного посту багатофункціональної станції супроводу і наведення малої дальності зенітного ракетного комплексу» - децимальний номер ZRS KRL ANL 001 06 2017 р. [201].

Концептуальний проект «Пересувного радіолокаційного посту багатофункціональної станції супроводу і наведення середньої дальності зенітного ракетного комплексу» - децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р. [200].

Ескізний проект «Пересувного радіолокаційного посту багатофункціональної станції супроводу і наведення середньої дальності зенітного ракетного комплексу» - децимальний номер ZRS KRL ANL 001 07 2017 р. [202].

Технічний проект РЛС «Фенікс», у рамках ДКР «Простір-Ф», номер державної реєстрації РК0108U000066Т, 2012 р. [211].

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток методології розроблення та удосконалення моделей надійності і методів підвищення ефективності технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій.

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

- обрати показники ефективності та 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 апараті теорії імовірностей 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 методів технічного обслуговування в сучасних умовах:

- 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;

- уперше розроблені 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 та виконана перевірка на адекватність розробленої моделі надійності АФАР;

- уперше 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;

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

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

- уперше розроблені метод і математичні моделі оптимізації технічного обслуговування однорівневої, дворівневої АФАР та групи АФАР, що дозволяє отримати значний вигаш від оптимізації за критерієм мінімуму математичного очікування питомих експлуатаційних витрат;
- 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 значну економію експлуатаційних витрат на етапі післягарантійного обслуговування АФАР РЛС, за рахунок прогнозування відмов каналів і модулів АФАР і своєчасного виконання робіт по ТО.

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 обслуговуються.

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 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 передавальних,

приймальних і приймально-передавальних РЛС. Розроблені математичні моделі і методи створюють основу та нові можливості для визначення показників експлуатаційної надійності та стратегій технічного обслуговування АФАР РЛС за фактичним станом. При цьому, отримані результати дозволяють:

- побудувати математичні моделі і визначити показники надійності приймальної, передавальної і приймально-передавальної АФАР РЛС;
- вибрати 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 одержаних результатів.

Виконані дослідження забезпечують досягнення практично важливих результатів, а саме:

1. Виконані розрахунки показників надійності активної фазованої антенної решітки и БССН ЗРК, показників ТО и переліку запасних електронних модулів у лобках концептуального проекту «Пересувного радіолокаційного посту БССН малої дальності ЗРК», 2016 р., Замовник КБ «Південне», м. Дніпро.

2. Виконані розрахунки показників надійності активної фазованої антенної решітки и БССН ЗРК, показників ТО и переліку запасних електронних модулів у лобках концептуального проекту «Пересувного радіолокаційного посту БССН середньої дальності ЗРК» 2016 р. Замовник: КБ «Південне».

3. Виконані розрахунки показників надійності активної фазованої антенної решітки и БССН ЗРК, показників ТО и переліку запасних електронних модулів в лобках ескізного проекту «Пересувного

радіолокаційного посту БССН малої дальності ЗРК» 2017 р., для КБ «Південне», місто. Дніпро.

4. Виконані розрахунки показників надійності активної фазованої антенної решітки и БССН ЗРК, показників ТО и переліку запасних електронних модулів в лобках ескізного проекту «Пересувного радіолокаційного посту БССН середньої дальності ЗРК», 2017 р. Замовник: КБ «Південне», місто. Дніпро.

5. Виконані розрахунки показників надійності активної фазованої антенної решітки АФАР «Феникс», показників ТО и переліку запасних електронних модулів в лобках технічного проекту ДКР «Простір-Ф», 2012 р., Замовник МОУ України.

6. 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 38 наукових працях. Роботи [68, 69, 72, 73, 74, 80, 81, 82, 83, 94, 96] виконані самостійно. З робіт, що опубліковані у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належить:

[55] - визначені методи чисельного рішення системи з чотирьох нелінійних рівнянь при контролі процесу плавки металу методами багатоколірної тонометрії;

[56] - розроблені програми для чисельного рішення системи з чотирьох нелінійних рівнянь при контролі процесу плавки металу методами багатоколірної тонометрії;

[70] - розроблені метод, стратегія і алгоритм технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій за фактичним станом;

[71] - розроблені програми розрахунку показників надійності активних фазованих антенних решіток з однорівневою і дворівневою структурною схемою надійності;

[75] - проведено аналіз статистичних даних по надійності в довідниках по надійності електрорадіовиробів;

[76] - представлений і досліджений метод імовірнісного аналізу електронних модулів і активних фазованих антенних решіток;

[77] - розглянуті переваги використання дифузійного немонотонного розподілу відмов електронних елементів в порівнянні з експоненціальним розподілом;

[78] - отримані аналітичні вирази для визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування групи активних фазованих антенних решіток, розміщених в антенном посту;

[79] - розроблені програми для розрахунку моделей апроксимації кривих інтенсивностей відмов електрорадіовиробів дифузійним немонотонним розподілом і композицією розподілів;

[84] - отримані аналітичні вирази для середнього наробітку до відмови і інтенсивності відмов активної фазованої антенної решітки за критерієм допустимого зниження максимальної дальності радіолокаційної станції;

[85] – розроблена і досліджена математична модель надійності активних фазованих антенних решіток за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток;

[86] - визначені критерії відмов і розроблені математичні моделі надійності активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій з k - рівнем структурною схемою надійності;

[87] – складена класифікація та визначені стратегії технічного обслуговування і експлуатації з наробітку та фактичним станом активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій;

[88] - розроблені програми для визначення вимог до показників надійності каналів і модулів активної фазованої антенної решітки;

[89] - розроблені програми відпрацювання показників надійності у процесі створення артилерійського озброєння на прикладі 30 мм гармати;

[90] - представлені оцінки показників безвідмовності і довговічності сучасних електрорадіоелементів за результатами випробувань на надійність;

[91] - представлені особливості методів розрахунку показників надійності електрорадіоелементів країн ближнього і далекого зарубіжжя виробів військової і цивільної радіоелектроніки;

[92] - представлені оцінки середнього та залишкового ресурсу корабельних радіоелектронних комплексів при дифузійному немонотонному розподілі наробітку до відмови;

[93] - представлений короткий аналіз методів розрахунку надійності оптоелектронної елементної бази, що представлена в зарубіжних довідниках щодо надійності;

[95] - проведено короткий аналіз моделей розрахунку надійності в зарубіжних довідниках при оцінці надійності електрорадіоелементів в процесі розробки авіаційної радіоелектронної апаратури;

[143] - сформульована та доказана теорема 2, затвердження якої складають теоретичні основи векторної бази діагностики;

[198] - виконані розрахунки надійності і показників технічного обслуговування РЛС «Фенікс» з АФАР та розрахунки необхідної кількості запасних приймально-передавальних модулів;

[199] - виконані розрахунки надійності і показників технічного обслуговування РЛС з АФАР для ПРП БССН МД ЗРК та розрахунки необхідної кількості запасних приймально-передавальних модулів;

[200] - виконані розрахунки надійності і показників технічного обслуговування РЛС з АФАР для ПРП БССН СД ЗРК та розрахунки необхідної кількості запасних приймально-передавальних модулів;

[201] - виконані розрахунки надійності і показників технічного обслуговування РЛС з АФАР для ПРП БССН МД ЗРК та розрахунки необхідної кількості запасних приймально-передавальних модулів;

[202] - 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 «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» в 2010 р. в м. Київ; 3-ій Міжнародній конференції «Артилерійські ствольні системи, боєприпаси, засоби артилерійської розвідки та керування вогнем» в 1999 р. в м. Київ; XII міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан и перспективи» в 2013 р. в м. Київ; Науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку навігації, спостереження та організації повітряного руху GNS/ATM» в 2014 г. в м. Київ; II науковій конференції «Проблеми експлуатації і розвитку ракетно-артилерійського озброєння військово-морських сил України» в 2011 року в м. Севастополь; Міжнародній науковій конференції «Статистичні методи обробки сигналів і даних» в 2013 р. в 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 330 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 272 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 42 таблицями, 62 рисунками. Список використаних джерел містить 237 найменувань, з них 209 кирилицею та 28 латиницею.

РОЗДІЛ 1.

СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальні положення

У світі розвитком радіолокаційної тематики займаються тисячі учених, інженерів и 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 «Фазовані антенні системи і технології» (IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology) [222]. 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. [224, 225, 228].

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. [107]. Найбільш відомими українськими вченими в області радіолокації є кандидати технічних наук Гузь В.І., Бутирін А.В., Ліпатов В.П., Демченко А.В., Красуцький О.О. (м. Київ), інженери Піза Д.М., Семенов Д.С, Бугрова Т.І. (м. Запоріжжя) та інші. [198-202, 210, 211].

Найважливішими складовими частинами забезпечення обороноздатності країни і безпеки повітряного руху над її територією є охорона повітряного простору, протиповітряна оборона. Ключова роль у вирішенні цих завдань належить радіолокаційним системам та побудованим на їх основі комплексам.

На рубежі 1990-2000 р.р. стало можливим створення повністю твердотільних радіолокаційних станцій в L і S - діапазонах довжин хвиль із дзеркальними антенами і активними фазованими антенними решітками. У сучасних РЛС використовується від декількох десятків до тисячі модулів, причому в кожному передавальному модулі до 10 потужних НВЧ транзисторів. Перевага твердотільних РЛС нерозривно пов'язана з переходом від зосереджених до розподілених джерел НВЧ потужності у вигляді модулів. Застосування великої кількості НВЧ модулів призводить до підвищення живучості станції в цілому, оскільки відмова навіть 10-20% від загального числа модулів не позбавляє РЛС працездатності [18 - 24]. Внаслідок цього стає можливим, що за рахунок використання запасних (резервних) модулів і ремонту відмовивших забезпечити безперервну працездатність РЛС протягом терміну служби 10-25 років. У цій ситуації вкрай актуальною є задача стосовно вивчення фізики відмов передавальних НВЧ модулів і розробці заходів щодо підвищення їх надійності та живучості РЛС.

1.2. Класифікація і схеми побудови фазованих антенних решіток

Фазованими називаються антенні решітки, в яких напрямок максимального випромінювання (прийому) змінюється шляхом регулювання фази радіосигналів у випромінюючих елементах. З визначення фазованих антенних решіток слідує, що в хвильові тракти, які з'єднують елементи ФАР з генератором (приймачем), повинні бути включені пристрої для забезпечення необхідного амплітудно-фазового розподілу на розкриві (фазування). У якості таких пристроїв зазвичай використовуються НВЧ - фазобертачі, фазообертачі, лінії затримки, атенюатори і комутатори, часто об'єднуються з відповідними випромінюючими елементами ФАР в конструктивні вузли - модулі ФАР [18 - 24].

Проведено аналіз характеристик сучасних фазованих антенних решіток (ФАР). В таблицях 1.1 и 1.2 представлена класифікація ФАР [167].

Таблиця 1.1

Види класифікації фазованих антенних решіток

Класифікація ФАР			
<i>За характером розміщення випромінювачів</i>	Еквідистантні		Нееквідистантні
<i>За способом качання проміння решітки</i>	Решітки з частотним скануванням		Решітки з фазовим скануванням
<i>За режимом роботи</i>	Суміщені (приймально-передавальні)		Роздільні, що працюють на прийом або передачу
<i>За способом живлення</i>	З активним розподілом потужності	З пасивним розподілом потужності	Зі змішаним розподілом потужності
<i>Пасивний розподіл потужності</i>	Пасивна система живлення фідерного (хвилевидного) типу		Оптична система живлення
<i>Пасивна система живлення фідерного типу</i>	Послідовна схема		Паралельна схема
<i>Оптична система живлення</i>	Відбивний варіант потужності		Прохідний варіант потужності

Таблиця 1.2

Типи фазованих антенних решіток

Типи фазованих антенних решіток		
Пасивна	Активна	Полуактивна

1.3 Приймально-передавальні модулі активних фазованих антенних решіток

Спочатку фінансована та розроблювана за підтримки Міністерством оборони США в 1980-1990 р.р. технологія НВЧ МІС на базі GaAs була придатна тільки для щільних конструкцій (поперечний переріз < 1 см.) модулів прийому/передачі, що працюють на частоті 10-20 ГГц. Досягнення у розробці НВЧ МІС стали можливі завдяки більш потужному програмному забезпеченні і малому споживанню потужності. Це дозволило інженерам розробляти з більшою точністю складні схеми і бібліотеки НВЧ-блоків. Якщо раніше розроблення НВЧ МІС була націлена на комбінування від десятків до сотень активних і пасивних компонентів (транзистори, PIN-діоди, резистори, конденсатори і дроселі) на одній підкладці з GaAs, то сьогодні функціональні можливості АФАР комбінуються з такими радіолокаційними блоками, як малошумні підсилювачі, підсилювачі потужності, блоки перемикання і фазообертачі з одноканальною або багатоканальною МІС. Ще більший функціонал/щільність рівнів досягається за допомогою багатокристальних модулів за використання новітніх матеріалів, пристроїв і методів інтеграції.

Поки ФАР набувають вигляду кремнієвих кристалів, що підтримують безліч випромінювачів, у випадках з високими вимогами до продуктивності (особливо, до показників шумів і вихідної потужності) кращими рішеннями виявляються комбінації кремнію з НЧ-трактом з напівпровідників категорії III-V. Все частіше GaN витісняє GaAs як матеріал для потужних і широкосмугових ВЧ-трактів. НВЧ МІС на базі GaN становить від 1/3 до 1/4 всього обсягу еквівалентної по потужності МІС на базі GaAs. Щільність потужності компенсує в два рази більшу вартість пластини GaN в порівнянні з пластиною на GaAs: всього 50-56 % від вартості пластини GaAs на вироблений ватт потужності. Оскільки вартість GaN продовжує падати, очікується повсюдна відмова від використання GaAs-пластин у ФАР [18-24, 105].

1.4 Системи вторинного електроживлення активних фазованих антенних решіток

Для побудови систем вторинного електроживлення АФАР використовують два способи: централізований принцип і нецентралізований або розподілений принцип. У системі, побудованій централізовано, потужний, великогабаритний перетворювач DC-DC напруги живить функціональну апаратуру (ФА) всіма необхідними номіналами напруг і струмів [17, 24, 43].

У розподіленій системі живлення випрямлена і відфільтрована напруга первинної мережі або безпосередньо розподіляється по системі живлення або перетвориться основним перетворювачем DC-DC до рівня напруги на проміжній шині і потім розподіляється по системі. Кожен функціональний вузол складається з одного або декількох перетворювачів DC-DC, підключених до проміжної шини, які забезпечують необхідні для кожного вузла окремого навантаження напруги і струму.

У разі розподіленого електроживлення кожна друкована плата або модуль ФАР має власний локальний DC-DC перетворювач, який розташовується в безпосередній близькості від навантаження. Передача енергії здійснюється на високих рівнях напружень і при малих токах відповідно, що дозволяє істотно зменшити втрати в мережі, а також знизити вартість шин, проводів, контактів і з'єднувачів. З іншого боку, це підвищує надійність системи.

Неефективне охолодження джерела живлення веде до зниження часу наробітку на відмову в 2 рази на кожні 10°C температури перегріву. Розподілені системи дозволяють скоротити час розробки електронної апаратури, так як можна вибрати перетворювач DC-DC для кожної друкованої плати під час її розробки. Використання розподілених систем електроживлення забезпечує більш високу якість перехідних процесів ніж централізована система, так як розподілені системи мінімізують зв'язку між модулім вторинного живлення (МВЖ) і навантаженням, у тому числі і паразитні. Перебудова систем розподіленого живлення здійснюється заміною локальних DC-DC перетворювачів. Зміна централізованої системи таким же чином може виявитися фізично неможливою, тому що трасування друкованих плат, розташування і кількість компонентів можуть бути недостатніми для збільшення потужності або числа номіналів вихідної напруги. За використання розподілених систем живлення, вирішуються питання управління, контролю, діагностики відмов і реєстрації стану системи. Ці системи в більшості випадків дозволяють уникнути введення зворотного зв'язку за напругою на навантаженні, а таким чином і проблем, пов'язаних з надійністю і діагностикою. Деякі DC-DC перетворювачі дозволяють програмувати рівні напруги, за яких перетворювач включається або вимикається. Також є можливість підлаштувати вихідну напругу перетворювача DC-DC за допомогою фіксованих резисторів і аналогових перемикачів або за допомогою цифро-аналогового перетворювача.

Питання надійності розподілених систем вторинного електроживлення активних фазованих антенних решіток

У розподіленій системі живлення значно легше локалізувати і усунути несправності, ніж в централізованій системі. Традиційними методами можна з легкістю реалізувати "гаряче" резервування модулів. Внаслідок чого, з'являється можливість перемикання всіх функцій одного МВЖ на інший в момент появи відмови. Якщо в розподіленій системі вихідна напруга перетворювача почне з який-небудь причини зростати, то це призведе до виходу з ладу тільки однієї плати. Перенапруження на виході централізованого МВЖ може вивести з ладу електронні компоненти всієї функціональної системи [17, 24, 43, 219, 220].

Вимоги до надійності перетворювачів залежать від вимог необхідних під час побудови системи: відмовостійкість або надійність. За визначенням, одинична відмова не може привести до виходу з ладу відмовостійкої системи. При побудові відмовостійкої системи необхідно повністю дублювати конструкцію пристрою і його самодіагностику. Під час побудови високонадійної системи тільки самі малоімовірні відмови можуть стати причинами виходу її з ладу.

Найбільш очевидною потенційною причиною відмови розподіленої системи є одинична відмова основного DC-DC перетворювача. У високонадійних системах використовується метод зниження імовірності появи відмов, який полягає у $(N + 1)$ – кратне резервування основних DC-DC перетворювачів (або $N + 2 \dots N + M$), де N – кількість перетворювачів, необхідних для забезпечення заданої потужності в навантаженні.

Відмовостійкі системи повинні мати $2N$ - кратне резервування основних DC-DC перетворювачів. У випадках, коли потужність навантаження перевищує встановлену потужність одного DC-DC перетворювача, вони з'єднуються паралельно.

Таке з'єднання також може застосовуватися і при $(N + 1)$ – кратне резервування. При паралельному з'єднанні перетворювачів, необхідно забезпечити однакові температурні умови їх експлуатації. Кількість компонентів в розподілених системах живлення перевищує кількість в централізованих. Виходячи з цього загальна надійність розподілених систем менше і виробники DC-DC перетворювачів для розподілених систем постійно працюють над збільшенням їх надійності [24, 43, 218, 219].

1.5 Коротка характеристика надійності радіолокаційних станцій з фазованою антенною решіткою

У табл. 1.3 представлені показники надійності активних НВЧ приладів, що застосовуються у випромінюючих каналах передавальної АФАР.

У табл. 1.4 представлені показники надійності низки країн діючих багатофункціональних РЛС з АФАР, що проектується, а саме: США, ФРН, Росії, КНР, Італії и України [19, 22].

Таблиця 1.3

Показники надійності активних НВЧ приладів

Тип активного НВЧ приладу	Середній наробіток на відмову (MTBF)	Інтенсивність відмов	Застосування в ФАР РЛС
1	2	3	4
Електровакуумні НВЧ прилади (клістриони, амплітрони, ЛБХ тощо)	500 год. – 5000 год.	0,002 1/год. – 0,0002 1/год.	AN/SPY- 1, С-300, Марс-Пассат тощо., Патріот: Р1, Р2

Завершення таблиці 1.3

1	2	3	4
Твердотільні НВЧ транзистори і кремнієві модулі	5000 год. – 100000 год.	0,0002 1/ год. – 0,00001 1/ год.	Патріот: РЗ, EMR, С-400, родина РЛС «Гамма»: Фурке, Панцир-С тощо
СВЧ транзистори та мікромодулі, виконані з використанням GaAs і GaN технологій	100000 год. – 1000000 год.	0,00001 1/год. 0,000001 1/год.	EMR, Туре 346А, Перспективні РЛС з АФАР

Таблиця 1.4

Показники надійності РЛС з ФАР

Назва виробу-аналога	Країна-розробник	Показники надійності	Тип ФАР	Елементна база
1	2	3	4	5
Багатофункціональна РЛС AN/SPY-1. AN/SPY- 1А,	США	Середній наробіток на відмову - 100 год.	Пасивна ФАР	ЛБХ, амплітрони
Багатофункціональна РЛС «Марс-Пассат»,	СССР, Україна	Середній наробіток на відмову - 100 год.	Активна ФАР	Предоконечного каскаду передавальної АФАР на клістронах, ЛБХ, підсилювачі потужності випромінюючих модулів

Продовження таблиці 1.4

1	2	3	4	5
Багатофункціональна РЛС AN/SPY-6 - активна твердотільна ФАР	США	Середній наробіток на відмову -1000 год.	Активна ФАР	Твердотільна елементна база на GaN - технології
Багатофункціональна РЛС Туре 346А, встановлена на авіаносці «Шаньдунь»	Китай	Середній наробіток на відмову -1000 год.	Цифрова АФАР	Чотири решітки АФАР, які розміщені аналогічно РЛС «Марс-Пассат»
РЛС ряду Гамма-Д (Панцир-С1, Фурке, Редут, С-350 «Вітязь» тощо) - цивільна (для аеропортів) і військова станція. «Фурке» - трьохкоординатна корабельна РЛС виявлення і цілевказівки, являє собою корабельний варіант станції виявлення цілей РЛС 1РС1-1Е (1РЛ123-Е) сухопутного зенітного ракетно-артилерійського комплексу «Панцир-С1».	Росія	Середній наробіток на відмову -1000 год. -3000 год. Середній час відновлення – 30 хв.	Напівактивна фазована антенна решітка дециметрового діапазону. Передача - пасивна (один промінь), прийом – напівактивний (три променя), стабілізація променя електронна.	У РЛС реалізовані новітні технічні рішення: плоска напівактивна ФАР на твердотільних передавальних модулях та каналів на СВЧ транзисторах

Продовження таблиці 1.4

1	2	3	4	5
Розробка ФГУП «ВНІПТ» (Москва). С-350 «Вітязь» - російський зенітний ракетний комплекс середньої дальності нового покоління.	Росія	500 год.	Напів-активна ФАР	Вся приймально-передавальна апаратура виконана на твердотільних елементах
EMR (European Midcourse Radar) - одна з версій радара ХВР, раніше відомого як GBR-P (Ground Based Radar-Prototype).	США	Середній наробіток на відмову -1000 год	Активна ФАР	Вся приймально-передавальна апаратура виконана на твердотільних елементах
ЗРК «Патріот» Р-3, Багатофункціональна РЛС з ФАР AN/MPQ-53 або AN/MPQ-65 розроблений у 2010-2014 р. р.	США	Середній наробіток на відмову -1000 год	Активна ФАР	Вся приймально-передавальна апаратура виконана на твердотільних елементах
ЗРС С-300 «Фаворит» (індекс замовника: 35Р6, 70Р6, 75Р6, 9К81, 3М-41). Родина ЗРС С-300 складається з командного пункту з радіолокатором виявлення (РЛВ) на базі пасивної АФАР.	Росія, розробка: 1975 р – 1980 р	Середній наробіток на відмову - 200 год	Пасивна АФАР	НВЧ електронні прилади і транзистори

Завершення таблиці 1.4

1	2	3	4	5
ЗРС С-300 Форт – ЗРС корабельного типу дальньої дії, створена на базі ЗРС С-300П ВМФ.	Росія, розробка: 1975 р. – 1980 р.	Середній наробіток на відмову - 250 год	Радар з напівактивною АФАР	Вся приймально-передавальна апаратура виконана на твердотільних елементах
ЗРС С-400 «Триумф» – російська ЗРС великої та середньої дальності, ЗРК. Базові частини системи: а) Радіолокаційний комплекс (РЛК) 91Н6Е. Панорамний радар із захистом від перешкод. Працює у дециметровому діапазоні. б) Функціональна РЛС (БФРЛС) 92Н6Е	РФ, 2008 р.	Середній наробіток на відмову - 1000 год. Середній ресурс до капітального ремонту – 10000 год. Середній термін служби до капітального ремонту – 10 років	Радари раннього виявлення з АФАР	НВЧ електронні прилади і транзистори
РЛС 80К6Т (80К6К1, 80К6М) Станція S – діапазону, Розробник КП НВК «Іскра» - 2015 р.	Україна	Середній наробіток на відмову - 1000 год.	Цифрова АФАР	Твердотільна елементна база

Проведений аналіз показників характеристик РЛС з АФАР показав, що в період з 1970 р. по 2015 р. мав місце значний розвиток радіолокаційної тематики в світі, що призвело до значного підвищення показників надійності:

- середній наробіток до відмови НВЧ-підсилювачів зросла в 200 разів - від 500 год. до 100 000 год.;

- середній наробіток на відмову АФАР зросла у 10 - 30 разів - від 100 год. до 1000 год. ÷ 3000 го .

Нині перед розробниками РЛС з АФАР ставлять ще більш жорсткі вимоги за показниками надійності та ефективності. Тому актуальною та необхідною для інженерів і вчених, які проектують РЛС, є вирішення проблеми розроблення і дослідження нових математичних моделей надійності і технічного обслуговування АФАР РЛС, які б враховували різні види відмов приймально-передавальних каналів і модулів, фазообертачів і вторинних джерел живлення.

1.6 Короткий огляд методів оцінки надійності радіолокаційних станцій з активними фазованими антенними решітками

1.6.1 Класифікація показників надійності радіолокаційних станцій з активними фазованими антенними решітками

РЛС з АФАР можуть експлуатуватися як системи, що обслуговуються та ремонтуються (з обслуговуючим персоналом, який виконує ТО, відновлювальні ремонти і середні ремонти РЛС) і як системи, що не обслуговуються та ремонтуються (з ремонтною бригадою) які з'являється на РЛС в разі необхідності виконання середнього ремонту.

Однак системи, що обслуговуються у процесі експлуатації РЛС з АФАР до проведення відновного ремонту, також є системами, що не обслуговуються.

Так як АФАР є квазізбитковими системами з деякою кількістю квазізбиткових вузлів і модулів, то вони відмовляють повністю тільки після відмови всіх квазізбиткових вузлів і модулів. Тобто повні відмови АФАР є порівняно рідкісними через значні проміжки часу. Тому на період часу до повної відмови АФАР (відмови всіх квазізбиткових каналів і вузлів) можна вважати системою, що не обслуговується.

Основними показниками надійності АФАР яка не потребує постійного обслуговування системи є: імовірність безвідмовної роботи, середній наробіток до відмови, гамма-відсотковий наробіток до відмови, щільність розподілу імовірності відмов, інтенсивність відмов, гамма-відсотковий ресурс (середній, призначений і залишковий).

Основними показниками надійності АФАР як системи, що обслуговується, є: середній час усунення одиначної відмови каналу (вузла); середній час ремонту, середній час на відмову без проведення робіт по ТО, середній час на відмову при проведенні ТО з кінцевим ЗІП, середній термін служби (до ремонту або до списання), середній ресурс (до ремонту або до списання).

1.6.2 Механізми і види відмов модулів надвисоких частот і модулів вторинного живлення активних фазованих антенних решіток

Автором роботи проведено огляд робіт з аналізом видів відмов передавальних і приймальних каналів НВЧ модулів, а також відмов модулів вторинного електроживлення. Аналіз показав, що для даних пристроїв характерна наявність як раптових, так і поступових відмов.

Так у роботі [3, 40] Грішаківа М.Н. показано, що «основним механізмом відмов НВЧ модулів при роботі в імпульсно-періодичних режимах є вплив на їх структуру термоциклів. Внаслідок цього, розвиток втомних явищ і деградація системи металізації НВЧ транзисторів, що призводить до зменшення напруги лавинного пробою в паузі між імпульсами і необоротного

теплового пробою. Основною причиною відмов НВЧ модулів є вплив на їх структуру потужних енерго- і термоциклів, що призводить до розвитку і накопичення руйнувань на границі матеріалів з різним тепловим коефіцієнтом розширення. Залежність накопиченого відсотка відмов НВЧ модулів від числа термоциклів N добре описується на початковій ділянці розподілом Вейбулла. Параметри цього розподілу помітно залежать від рівня якості (засміченості дефектами) випробуваної партії модулів. З ростом амплітуди температурних циклів величина N різко зменшується».

У роботі В.М. Антошина, В.Л. Якімова [3] показано «у результаті аналізу експериментальних статистичних даних про відмови уніфікованого ряду РЛС великоблочної структури, побудованих на основі функціонально-конструктивної матриці, встановлено, що для них характерна змінна інтенсивність відмов протягом терміну експлуатації. У цих умовах найбільш точним описом потоку відмов конструктивних елементів РЛС є використання розподілу Вейбулла з параметрами, вибраними з урахуванням апріорних даних про надійність конструктивних елементів».

Виходячи з вищевикладеного випливає, що для розрахунку надійності каналів і модулів АФАР РЛС необхідно враховувати не тільки раптові і поступові відмови, але і їх спільний прояв: при експоненціальному розподілу, розподілу Вейбулла, дифузійному немонотонному розподілу і композиції зазначених вище розподілів.

1.6.3 Короткий аналіз методів оцінки надійності активних фазованих антенних решіток

Розробці методів розрахунку надійності АФАР за кордоном присвячено ряд робіт. У роботах американського проф. А.К. Агравала [218, 219] розглядається розрахунок надійності аналогової АФАР за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток. У роботі [218] досліджується надійність

аналогової АФАР, представлена у вигляді матриці на 8000 елементів зі значенням амплітуди головної бічної пелюстки розподілу Тейлора, рівному 40 дБ. і гексагональною структурою розміщення випромінювачів, відстань за елементами якої становить половину довжини хвилі. Відмовою АФАР за цим вважається підвищення мінімального рівня ближніх бічних пелюсток амплітудно-фазового розподілу вище максимально допустимого рівня. Відмова АФАР настає під час перевищення гранично-допустимої кількості відмов будь-якого з трьох типів компонентів антени: приймально-передавальних модулів ($N_{T/R} = 8000$) модулів керування ($N_{CM} = 1000$) та джерел живлення ($N_{PS} = 1000$).

У роботі [218] представлені значення гранично-допустимої кількості відмов компонентів АФАР під час підвищення рівня бокових пелюсток на 3 дБ:

$$F_{T/R} = 256; F_{CM} = 5; F_{PS} = 5.$$

та під час підвищення рівня бокових пелюсток на 6 дБ:

$$F_{T/R} = 512; F_{CM} = 10; F_{PS} = 10.$$

Граничні кількості відмов приймально-передавальних модулів - $F_{T/R}$, модулів керування - F_{CM} та джерел живлення - F_{PS} у роботі [218] визначались методом статистичного моделювання рівня бокових пелюсток АФАР.

У роботі [218] представлена формула для визначення середнього наробітку на відмову аналогової АФАР ($MTBF_{ANT}$):

$$MTBF_{ANT} = \left[(F_{T/R} \times MTBF_{T/R} / N_{T/R})^{-1} + (F_{CM} \times MTBF_{CM} / N_{CM})^{-1} + (F_{PS} \times MTBF_{PS} / N_{PS})^{-1} \right]^{-1} \quad (1.1)$$

де:

$$MTBF_{T/R} = 200000 \text{ год.}, \quad MTBF_{CM} = 100000 \text{ год.}, \quad MTBF_{PS} = 50000 \text{ год.},$$

$$MTBF_{ANT} \approx 162 \text{ год.},$$

За формулою (1.1) можна вивести формулу для інтенсивностей відмов АФАР, яка буде мати більш простий вигляд:

$$\lambda_{ANT} = \lambda_{T/R} + \lambda_{CM} + \lambda_{PS} , \quad (1.2)$$

$$\text{де:} \quad \lambda_{T/R} = \frac{N_{T/R}}{F_{T/R} \times MTBF_{T/R}}, \quad \lambda_{CM} = \frac{N_{CM}}{F_{CM} \times MTBF_{CM}}, \quad \lambda_{PS} = \frac{N_{PS}}{F_{PS} \times MTBF_{PS}} \quad (1.3)$$

при $\lambda_{T/R} = 0,00015625 \text{ год.}^{-1}$; $\lambda_{PS} = 0,00400 \text{ год.}^{-1}$;

$\lambda_{CM} = 0,00200 \text{ год.}^{-1}$ інтенсивність відмов АФАР дорівнює:

$$\lambda_{ANT} = 0,00615625 \text{ год.}^{-1}$$

Вид формули (1.1) дозволяє зробити висновок, що надійність АФАР у роботі описується експоненціальним розподілом імовірності відмов. Це є серйозним недоліком запропонованої в роботі [218] моделі надійності, так як надлишкова структура АФАР повинна описуватися розподілом наробітку на відмову близьким до нормального розподілу.

Проведений аналіз робіт показав, що основними характеристиками ефективності АФАР, які змінюються при відмові елементів антенної решітки, є випромінювана потужність і середній рівень бічних пелюсток амплітудно-

фазового розподілу діаграми спрямованості антенної решітки. Тому для розрахункової оцінки показників надійності приймальної, передавальної і приймально-передавальної АФАР РЛС можлива і необхідна розробка математичних моделей надійності, що враховують такі критерії відмови:

- допустиме погіршення рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості антенної решітки;
- допустиме зниження рівня максимальної дальності радіолокатора.

1.7 Короткий аналіз показників надійності вітчизняної та імпоротної елементної бази апаратури радіоелектронних систем

1.7.1 Загальні положення

Однією з основних проблем при розробленні високонадійних радіоелектронних систем є проблема прогнозування показників надійності елементів, складових частин і системи в цілому у процесі проектування.

При розробці в Україні сучасної радіоапаратури фірми-розробники змушені використовувати до 85% імпоротної елементної бази, що виготовляються фірмами-виробниками країн ближнього і далекого зарубіжжя (Російська Федерація, Республіка Білорусь, США, Японія, країни ЄС, Китай та ін.). Тому при прогнозуванні показників надійності (безвідмовності і довговічності) радіоапаратури, яка розробляється на основі імпоротної елементної бази, підприємства-розробники зобов'язані застосовувати статистичні дані та математичні моделі, які рекомендуються довідковими посібниками щодо надійності провідних країн світу.

1.7.2 Загальна характеристика стандартів та довідникових посібників щодо прогнозування надійності електрорадіовиробів, що застосовуються у світовій практиці

Міждержавним стандартом ГОСТ 27.301-95 [190] (розробники національні органи щодо стандартизації Білорусії, Казахстану, Молдови, Російської Федерації, Узбекистану та України) рекомендується застосування військового довідника США - MIL-HDBK-217F і довідників по надійності виробів електронної техніки (ВЕТ) Російської Федерації, загально промислового та спеціального призначення, для розрахунку інтенсивностей відмов серійно-випускних і нових електронних та електротехнічних елементів з урахуванням їх навантаження, якості виготовлення, та областей застосування апаратури.

У сучасній світовій практиці для прогнозування надійності електрорадіовиробів (ЕРВ) найбільш широко використовуються наступні довідникові посібники і стандарти:

- “Единый справочник “Надежность электрорадиоизделий”, Минобороны СССР, ЦНИИ “Электронстандарт”, редакция 1990 г.” (Довідник застосовується спеціальними підприємствами України для оцінки надійності вітчизняних ЕРВ та країн близького зарубіжжя) [179];

- “Справочник по надежности отечественных и зарубежных ЭРИ, РНИИ “Электронстандарт”, редакция 2000 р. і редакция 2002 р. (Довідники застосовуються фірмами-виробниками Російської Федерації);

- Американський довідник “MIL-HDBK-217F, 2 December 1991, Reliability prediction of electronic equipment with MIL-HDBK-217F, NOTICE 2, 28 February 1995,” (Військовий довідник США щодо прогнозування надійності електрорадіоелементів, редакція 1991 р., корегування №2 - 1995 р. – Довідник широко застосовується фірмами-розробниками США, Канади, Японії, Китаю та країн ЄС, а також Російської Федерації та Білорусії) [203];

- Міжнародний стандарт IEC 61709, “Electronic components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion” (Визначення допустимих значень коефіцієнтів навантаження в залежності від зовнішніх впливаючих чинників. Цей стандарт є обов’язковим при використанні стандартів MIL-HDBK-217 F та IEC TR 62380) [205];

- Міжнародний стандарт IEC TR 62380 Ed.1, “Reliability Data Handbook - Universal model for reliability prediction of Electronics components, PCBs and equipment” редакція 2004 р. (Довідникові дані щодо надійності – універсальна модель для розрахунку надійності електронних компонентів друкованих плат та обладнання. Довідники широко використовуються фірмами-розробниками США, Канади, країн ЄС, а також Російської Федерації та Білорусії) [204];

- Міжнародний стандарт IEC 60721-1, “Classification of environmental conditions - Part 1: Environmental parameters and their severities” (Класифікація областей застосування. Частина I. Характеристика зовнішніх впливаючих чинників та їх допустимі значення - Стандарт обов’язковий при використанні стандарту IEC TR 62380);

- Європейський довідник SR-322 “Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment” Telcordia Technologies (Довідник для прогнозування надійності електронного обладнання – застосовується у країнах ЄС);

- Англійський довідник NSWC-98 “Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment” (Довідник для прогнозування надійності морського механічного і електромеханічного устаткування - застосовується США, Канадою, Японією, країнами, що входять в ЄС та Російською Федерацією);

- Китайський довідник Chinese 299E (Довідник застосовується в КНР для прогнозування надійності військової електроніки).

У “Едином справочнике "Надежность электрорадиоизделий" (Миноборони СССР)” [179] представлені статистичні дані та математичні моделі для прогнозування інтенсивності відмов і гамма-відсоткового ресурсу основних

видів ЕРВ: інтегральних мікросхем, напівпровідникових пристроїв, оптоелектронних пристроїв, НВЧ приладів, резисторів, конденсаторів, малих електродвигунів та ряду інших виробів.

Значення експлуатаційної інтенсивності відмов ЕРВ, розраховуються за математичними моделями, які мають вигляд:

$$\lambda_e = \lambda'_6 K_p \prod_{i=1}^n K_i \quad (1.4)$$

$$\lambda_e = \lambda'_{6.с.г} K_p \prod_{i=1}^n K_i \quad (1.5)$$

де: λ'_6 ($\lambda'_{6.с.г}$) - вихідна інтенсивність відмов даного типу (групи) ЕРВ для застосування в стаціонарній наземній апаратурі;

K_p – коефіцієнт режиму що враховує зміну λ'_6 ($\lambda'_{6.с.г}$) в залежності від електричного навантаження та (або) температури навколишнього середовища;

K_i – коефіцієнти, що враховують зміну експлуатаційної інтенсивності відмов в залежності від різних чинників;

n – число врахованих чинників.

У даному довіднику представлені статистичні дані щодо інтенсивностей відмов ЕРВ (групові і для конкретних типів ЕРВ) при застосуванні їх у стаціонарних полегшених умовах (електричне навантаження, що дорівнює 0,4 від номінальної, температура навколишнього середовища дорівнює 30 °С). У довіднику також представлені коефіцієнти жорсткості K_i , що враховують вплив факторів навколишнього середовища і умови застосування апаратури (наземна, корабельна, авіаційна тощо), а також два рівня якості виготовлення ЕРВ при використанні у військовій радіоапаратурі. Обсяг довідкової інформації про ЕРВ, представлений у довіднику, повністю достатній для того щоб проводити розрахунки надійності ЕРВ без застосування додаткових довідкових даних з інших джерел. В даний час в Російській Федерації використовуються більш сучасні довідники для автоматизованого розрахунку показників надійності ЕРВ, редакції 2006 р. і 2008 р.

2.3 У військовому довіднику США щодо надійності ЕРВ (MIL-HDBK-217F) [203-207] представлені статистичні дані та математичні моделі для прогнозування інтенсивності відмов основних видів ЕРВ: інтегральних мікросхем, мікропроцесорів, гібридних мікросхем і модулів, мікросхем пам'яті, напівпровідникових пристроїв, елементів НВЧ, оптоелектроніки, резисторів, конденсаторів, малих електродвигунів та інших виробів: для інтегральних мікросхем і мікропроцесорів (Bipolar Devices, Digital and Linear Gate/Logic Arrays. MOS Devices, Digital and Linear Gate/Logic Arrays. Field Programmable Logic Array (PLA) and Programmable Array Logic (PAL). Microprocessors):

$$\lambda_P = (C_1 \pi_\gamma + C_2 \pi_E) \pi_Q \pi_L, \text{ відмов} \times 10^{-6} \text{ год.} \quad (1.6)$$

для напівпровідникових пристроїв:

$$\lambda_P = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_R \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E, \text{ відмов} \times 10^{-6} \text{ год.} \quad (1.7)$$

де: λ_P – інтенсивність відмов ЕРВ;

λ_b – базова інтенсивність відмов, зазвичай виражена моделлю, яка зв'язує вплив електричних і теплових факторів на ЕРВ;

$\pi_T, \pi_A, \pi_R, \pi_S, \pi_C, \pi_Q, \pi_E$ – коефіцієнти, що уточнюють базову інтенсивність відмов для застосування у відповідних типах зовнішніх умов та з урахуванням інших параметрів, які впливають на надійність виробу (елементу).

Статистичні дані для інтенсивностей відмов ЕРВ класифіковані тільки для груп ЕРВ, для усереднених режимів при застосуванні в стаціонарних полегшених умовах (електричне навантаження, що дорівнює 1,0 від номінальної, температура навколишнього середовища дорівнює 25°C). У військовому довіднику США представлені коефіцієнти умов застосування (жорсткості) π_E , що враховують вплив факторів навколишнього середовища і умови застосування апаратури (наземна, корабельна, авіаційна, космічна) (таблиці 1.5), та коефіцієнти якості π_Q для різних видів ЕРВ в залежності від умов випробувань, визначених відповідними стандартами (таблиці 1.6 – 1.9). Так як в довіднику MIL-HDBK-217F [203] повністю відсутня інформація про

конкретні типи ЕРВ, то його використання для прогнозування надійності конкретних ЕРВ можливо тільки при попередньому створенні інформаційної довідкової бази з ЕРВ (із каталогів та довідкової інформації фірм-виробників).

Таблиця 1.5

Тип навколишнього середовища	Символ π_E	Еквівалент МІЛ-НДВК-217F Символ π_E	Область застосування
1	2	3	4
Земля, м'який клімат	G _B	G _B , G _{MC}	Стаціонарна, контрольована температура і вологість навколишнього середовища, можливий поточний ремонт; включає лабораторні прилади та випробувальне обладнання, медичне електронне обладнання, наукові та комерційні обчислювальні комплекси, ракетне і допоміжне обладнання в наземних шахтних пускових установках
Земля, стаціонарна	G _F	G _F	Помірно регульовані чинники навколишнього середовища, наприклад установка в стаціонарні стійки з достатнім повітряним охолодженням і можлива установка в неопалюваних приміщеннях; включає в себе радіолокаційне обладнання управління повітряним рухом і устаткування зв'язку
Земля, мобільна	G _M	G _M , M _P	Обладнання, встановлене на колісні або гусеничні рухомі засоби, M _P і переносне обладнання; включає обладнання тактичних ракет наземної підтримки, тактичні системи управління вогнем, переносне устаткування зв'язку, лазерні приціли і полігонні видошукачі.

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4
Морські, укриті	N _s	N _s , N _{SB}	Включає умови експлуатації укритого обладнання або розташованого нижче палуби на надводних кораблях та обладнання, встановлені на підводних човнах
Морські, неукриті	N _u	N _u , N _{UU} , N _H	Незахищений обладнання, що перевозиться на надводних кораблях, що піддається впливу погодних умов, і устаткування, що піддається впливу солоної води. Включає в себе обладнання гідролокаторів та обладнання, що встановлені на судах на підводних крилах.
Перевезення по повітрю, жилі зони, транспортна авіація	A _{IC}	A _{IC} , A _{IT} , A _{IB}	Типові умови у вантажному відділенні, яке може бути зайнято екіпажем літака. Умови граничного тиску, температури, удару і вібрації є мінімальними. В якості прикладів можна навести літаки дальньої авіації, такі як C130, C5, B52 і C141. Ця категорія належить також до жилих зон в літаках малого класу, таких як T38.
Перевезення по повітрю, жилі зони, винищувач	A _{IF}	A _{IF} , A _{IA}	Такі, як A _{IC} , але встановлені на літаках з високими льотними даними (винищувачі і штурмовики). Приклади включають F15, F16, F111, F/A18 і A10.
Перевезення по повітрю, незаселені зони, транспортна авіація	A _{UC}	A _{UC} , A _{UT} , A _{UB}	Зони з нерегульованими умовами навколишнього середовища, які не можуть бути зайняті екіпажем під час польоту. Граничний тиск, температура, удар можуть бути досить високими. Приклади включають в себе незаселені відсіки літаків дальньої авіації, такі як C130, C5, B52 і C141. Ця категорія також застосовується до нежилих відсіків літаків малого класу з низькими льотними характеристиками, наприклад T38

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4
Перевезення по повітрю, незаселені зони, винищувач	A _{UF}	A _{UF} A _{UA}	Такі ж, як і A _{UC} , але для обладнання, встановленого на літаках з високими льотними характеристиками (винищувачі і штурмовики). Приклади включають F15, F16, винищувач F111 і A10.
Перевезення по повітрю, апарати, забезпечені обертальними лопастями	A _{RW}	A _{RW}	Обладнання, встановлене на вертольотах. Застосовується до обладнання, що встановлене як зовні, так і всередині, такому як лазерні приціли, системи управління вогнем і зв'язкова апаратура
Космос, політ	S _F	S _F	Навколосемна орбіта. Умови, подібні з м'якими земними умовами. У літального апарату вимкнений силовий двигун, апарат не входить в щільні шари атмосфери; включає супутники і космічні літальні апарати багаторазового використання.
Ракета, політ	M _F	M _F , M _{FA}	Умови відносяться до ракет, у яких працює силовий двигун, крилатих ракет і ракет, що знаходяться в польоті по балістичній траєкторії.
Ракета, момент пуску	M _L	M _{SL}	Суворі умови, що пов'язані з пуском ракети (авіаційної, повітряної, наземної чи морської). Умови, що виникають на космічному кораблі, форсовано виводиться на орбіту, і на літальному апараті при вході в щільні шари атмосфери і приземлення на парашуті. Також застосовується до твердопаливних ракетних двигунів, силових установок, які забезпечують політ, до умов, що виникають при пуску торпеди і ракети з підводних човнів.
Артилерійське знаряддя, постріл.	C _L	C _L	Надзвичайно суворі умови відносяться до стріляючого 155 мм снарядами, артилерійському знаряддю та 5 - дюймовому міномету. Умови застосовуються до снарядів від моменту пострілу до ураження цілі

Таблиця 1.6

Коефіцієнт умов застосування π_E

Умови застосування (Environment)	Коефіцієнт умов застосування π_E						
	Інтегральні мікросхеми	Діоди та транзистори низькочастотні	Діоди та транзистори високочастотні	Оптоелектроніка	Резистори	Конденсатори	З'єднувачі
1	2	3	4	5	6	7	8
G_B	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
G_F	2,0	6,0	2,0	2,0	4,0	10	1,0
G_M	4,0	9,0	5,0	8,0	16	20	8,0
N_S	4,0	9,0	4,0	5,0	12	7,0	5,0
N_U	6,0	19	11	12	42	15	13
A_{IC}	4,0	13	4,0	18	12	3,0	2,0
A_{IF}	5,0	29	5,0	6,0	23	15	5,0
A_{UC}	5,0	20	7,0	8,0	31	25	8,0
A_{UF}	8,0	43	12	17	43	30	12
A_{RW}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
S_F	5,0	14	9,0	9,0	37	20	10
M_F	12	32	24	24	87	50	27
M_L	22	320	250	450	1728	570	904

Таблиця 1.7

Коефіцієнти якості π_Q для низькочастотних діодів та транзисторів

Коефіцієнти якості π_Q для низькочастотних діодів та транзисторів	
Рівень якості (Quality)	π_Q
JANTXV	0,7
JANTX	1,0
JAN	2,4
Lower (знижений))	5,5
Plastic	8,0

Таблиця 1.8

Коефіцієнти якості π_Q для інтегральних мікросхем

Коефіцієнти якості π_Q для інтегральних мікросхем	
Рівень якості	π_Q
<u>Class S Categories:</u> 1: Procured in full accordance with MIL-M-38510 [4], Class S requirements. 2. Procured in full accordance with MIL-I-38535 [5] and Appendix B thereto (Class U). 3. Hybrids: Procured to Class S requirements (Quality Level K) of MIL-H-38534 [6]	0,25
<u>Class B Categories:</u> 1. Procured in full accordance with MIL-M-38510 [4] Class B requirements. 2. Procured in full accordance with MIL-I-38535 [5] (Class Q). 3. Hybrids: Procured to Class B requirements (Quality Level H) of MIL-H-38534[6]	1,0
<u>Class B-1 Categories:</u> Fully compliant with all requirements of paragraph 1.2.1 of MIL-STD-883 [7] and procured to a MIL drawing. DESC drawing or other government approved documentation entati (Does not include hybrids). For hybrids use custom screening section below	2,0

Коефіцієнти якості π_Q

для високочастотних діодів та транзисторів (All Types Except Schottky)

Коефіцієнти якості π_Q для високочастотних діодів та транзисторів (All Types Except Schottky)	
Рівень якості (Quality)	π_Q
JANTXV	0,5
JANTX	1,0
JAN	5,0
Lower	25
<i>Plastic</i>	50

Це призводить до певних труднощів при використанні довідника MIL-HDBK-217F [203] для виконання розрахунків надійності зарубіжних ЕРВ. Однак даний стандарт широко використовується з 1986 р. у світовій практиці, як основний, для автоматизованого розрахунку показників надійності ЕРВ в процесі розроблення військової і цивільної радіоелектронної апаратури.

1.7.3 Міжнародний стандарт IEC TR 62380 Ed.1.

Математичні моделі, представлені в довіднику “Надежность электрорадиоизделий” (Міноборони СРСР) і військового довіднику США, припускають тривале перебування апаратури у включеному стані при постійному максимальному впливі кліматичних факторів, що призводить до значного зниження прогнозних оцінок показників надійності. У процесі реальної експлуатації апаратури, температура навколишнього середовища циклічно змінюється як протягом доби, так і протягом року. Тому в новому міжнародному стандарті IEC TR 62380 Ed.1, "Reliability Data Handbook - Universal model for reliability prediction of Electronics components, PCBs" (Універсальна модель для розрахунку надійності електронних компонентів, друкованих плат та обладнання, редакція 2004 р.) [204] ці недоліки усунуто. У стандарті представлені статистичні дані та моделі прогнозування показників

надійності ЕРВ, враховують усереднену модель клімату, річні та денні циклічні моделі зміни температури і області застосування апаратури (наземна, морська, авіаційна, космічна) відповідно до міжнародного стандарту ІЕС 60721-1. Коефіцієнти якості в стандарті не застосовуються.

Попередні оцінки показників надійності ЕРВ, визначені за різними довідниками, значно відрізняються: так значення інтенсивності відмов, визначені за довідником “Надежность электрорадиоизделий” (Міноборони СРСР) і по військовому довіднику США (MIL-HDBK-217F), будуть в 3 - 15 разів вище значень інтенсивностей відмов, які визначені за міжнародним стандартом ІЕС TR 62380.

1.7.4 Автоматизація розрахунків надійності апаратури

Враховуючи необхідність значного скорочення трудомісткості обчислень при розрахунку показників надійності ЕРВ в процесі проектування радіоелектронних систем, у всьому світі широкий розвиток отримали методи автоматизованого розрахунку показників надійності ЕРВ

У Росії в даний час відомі розробки РНДІ “Електронстандарт” (м. Санкт-Петербург) - автоматизовані довідники щодо надійності ЕРВ, редакції 1996 р., 2000 р. та 2002 р. та АРМ “АСОНІКА” МІЕМ (Москва).

У США в даний час широко використовуються програмні комплекси: RAM Commander 7.7 (MTBF Calculation), Лямбда прогноз (Λ - predict), RDF 2000 Reliability Prediction Procedure та ін, які використовують більше 30 найбільш відомих у світі довідкових посібників з прогнозування надійності електронного, електромеханічного і механічного устаткування.

Для розрахунку показників надійності радіоелектронних і механічних пристроїв у світовій практиці проектування широко використовується програма Reliability Manager, входящая в САПР Mentor Graphics.

У НДІ "Квант" (м. Київ) розроблений і широко використовується при розробці радіоелектронних систем програмний комплекс для автоматизованого розрахунку показників надійності ЕРВ, що використовує три основних джерела з надійності:

- "Единый справочник по надежности ЭРИ (Минобороны СССР), редакция 1990 г." [179];
- Американський довідник з надійності ЕРВ (MTBF-HDBK-217F), редакція 1995р. [203];
- Міжнародний стандарт ІЕС TR 61380, редакція 2004 р. [204].

1.7.5 Експериментальна оцінка інтенсивностей відмов електрорадіовиробів за результатами прискорених випробувань

Показники надійності сучасної елементної бази визначаються за результатами прискорених випробувань електрорадіоелементів. Математичних рівнянь, що визначають довговічність, не існує, але практично вважається, що для напівпровідникових приладів і ІС довговічність обернено пропорційна прикладній напрузі, щільності струму і зворотному значенню абсолютної температури за законом Арреніуса.

У виробничій практиці показники довговічності (мінімальний наробіток і гамма-відсотковий ресурс) інтегральних схем визначають за результатами статистичного або динамічного електротермотренування (ЕТТ), що дозволяє виявляти відмови ІС з різним ступенем активації. Найбільшого поширення набули два варіанти ЕТТ.

Перший варіант: Граничне допустиме навантаження (зазвичай 20% - 30% від номінальної напруги живлення VCC і гранична температура (125 °C - 150 °C), припущення кореляції результатів експлуатації до температури 55 °C, час випробувань не більше 1000 год (у зарубіжній аббревіатурі HTOL - High Temperature Operating Life Test, метод 1005, 1006 по MIL-STD-883).

Другий варіант: Режим температур, фізично допустимих конструкцій ІС (200 °С- 300 °С), тривалістю 48 год. - 100 год. і більше (максимально 1000 год або 4000 год) - високотемпературне старіння з подачею або без подачі електричного навантаження. До першого варіанту випробувань можна віднести всі види електротермотренувань. Тренування прискорює старіння ІС і призначене для "випалювання" ранніх відмов та підвищення надійності партії залишених в ній ІС. Фахівці фірми Analog Devices вважають, що 160 годин. випробувань в режимі 125 °С еквівалентно 10 років при температурі 55 °С, а 100 год. в тому ж режимі - 9 років при температурі 55 °С.

Динамічна ЕТТ придатна для прогнозування довговічності більшості ІС, що пов'язано з відмовами, та з низькою енергією активації (порядку 0,03-0,40 еВ), в тому числі для ВІС і НВІС. Випробування при температурах, фізично допустимих конструкцій ІС (200 °С - 300 °С) будуть ініціювати відмови, пов'язані з високою енергією активації. Високотемпературне старіння здатне виявити протягом декількох годин такі зміни в елементах конструкції схем, які в кінцевому рахунку, відбулися б у них при тривалій роботі (можливо за кілька десятків років) в нормальних умовах. При високих температурах, близьких до порогових, можна спостерігати відмови вже через 48 год - 100 год. випробувань, відносно рідко виявляються при помірних температурах. Перший вид випробувань регламентується стандартом MIL-HDBK-217F [203], що використовується провідними фірмами - виробниками ІС, такими як ОКІ, Atmel, ADI, Siemens, Microchip, Altera та ін.

Розрахунок експериментальної інтенсивності відмов ЕРВ з використанням статистики хи – квадрат

Визначення значень прискорюючих чинників

Коефіцієнт прискорення за рахунок температури (Thermal Acceleration)

$$TAF = \exp \left\{ \frac{E_a}{k} \times \left[\frac{1}{T_f + (P_f \times \theta_{JAf})} - \frac{1}{T_s + (P_s \times \theta_{JAs})} \right] \right\} \quad (1.8)$$

де:

TAF - коефіцієнт прискорення за рахунок температури – (Thermal Acceleration Factor),

E_a - енергія активації - (Activation Energy) (eV),

k - постійна Больцмана - (Boltzman's Constant) ($8,617 \times 10^{-5}$ eV/°K),

T - температура навколишнього середовища (по Кельвину) - (Temperature (°K))

f - нормальні умови (Field Conditions)

s - умови навантаження, стресові (Stress Conditions)

P - потужність розсіювання - (Power Dissipation) (W)

Q_{ja} - Thermal Resistance Coefficient – Junction to Ambient (°C/W)

Коефіцієнт прискорення за рахунок напруги живлення (Voltage Acceleration)

$$VAF = \exp[Z(V_s - V_n)] \quad (1.9)$$

где,

VAF - коефіцієнт прискорення за рахунок напруги (Voltage Acceleration Factor)

V_s - прискорююча напруга (Stress Voltage (V))

V_n - номінальна напруга (Nominal Voltage (V))

Z - Voltage Acceleration Constant (usually, $0.5 < Z < 1.0$)

AF - узагальнений коефіцієнт прискорення (Overall Acceleration)

$$AF = TAF \times VAF \quad (1.10)$$

1.7.6 Визначення експериментальної інтенсивності відмов

Експериментальну інтенсивність відмов ІС провідні фірми-виробники (наприклад, Siemens AG, Analog Devices (ADI), Atmel, Xilinx, Altera, QuickLogic, Actel) рекомендують оцінювати за результатами ЕТТ (переважно динамічної) за формулою:

$$\lambda = \frac{\chi^2_{(1-\frac{\alpha}{100}, 2n+2)} \times 10^9}{2 \times AF \times DH} \quad (1.11)$$

де:

χ^2 - розподіл хи – квадрат (табульована величина, що залежить від довірчої імовірності та числа відмов);

$1 - \frac{\alpha}{100}$ – довірна імовірність з рівнем значимості α ,

$(2n + 2)$ – число ступенів свободи;

AF - узагальнений коефіцієнт прискорення;

DH - повний час випробувань;

n – кількість відмов

1.7.7 Оцінка надійності конденсаторів при прискорених випробуваннях

Керамічні конденсатори

Узагальнений коефіцієнт прискорення

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n \exp \frac{E_a}{K_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (1.12)$$

де:

$$n = 1,5 - 7,0 ; E_a = 1,3 - 1,5 ; K_B = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

Танталові ЧПП – конденсатори

Інтенсивність відмов ЧПП – конденсаторів

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 \times 2^{(T-T_0)/10}, \quad (1.13)$$

Example, for a capacitor:

Rated: $V_0 = 20V$ DC, $T_0 = 85^\circ C$, Operated: $V = 5V$ DC, $T = 45^\circ C$

Failure Rate: NTC-T / NTC-L / NTC-P : 1%/1000 hours at $+85^\circ C$ with 1.0 Ω/V circuit resistance

If λ_0 is equal to 1%/1000 hrs., the estimated failure rate is as follows:

$$\lambda = \lambda_0 (5/20)^3 \times 2^{(45-85)/10}$$

$$\lambda = \lambda_0 \times (1/64) \times \left(\frac{1}{16}\right), \quad \text{якщо } \lambda_0 = 1\% \frac{1}{1000} \text{ год. ,}$$

тому

$$\lambda = 0,001\% / 1000 \text{ год.} \quad \text{або} \quad \lambda = 10 \text{ FIT}$$

1.7.8 Оцінка рівня надійності елементної бази

Одиницею виміру інтенсивності відмов ЕРВ - λ є один 1 / год. Для його підрахунку зарубіжні виробники зазвичай беруть число приладів, які можуть відмовити протягом кожні 100000 год. роботи (тобто відсоток на 1000 год). Більш кращим є кількість відмов на 10⁹ рок. (так званий FIT), так як це дозволяє більш зручно і наглядно відобразити надмалі інтенсивності відмов БІС.

Таким чином, $1 \text{ FIT} = 10^4 \% / 1000 \text{ год.} = 10^{-9} \text{ год.}$

Аналіз інтенсивності відмов сучасних БІС показує, що вона стрімко наближається до величини 1 FIT і менше. Так дослідницький комітет з

напівпровідникової промисловості (ЄС) встановив: для фірм-виробників забезпечити вимогу щодо надійності до БІС на 2001 р. на рівні 0,1 FIT.

Для оцінки показників надійності сучасної елементної бази необхідно використовувати математичні моделі прогнозування надійності, представлені в міжнародному стандарті ІЕС TR 62380 [204].

Для виконання великого обсягу трудомістких розрахунків по надійності обов'язковим є попереднє створення інформаційної бази даних по ЕРВ, розроблення та впровадження автоматизованих методів розрахунку надійності вітчизняних та імпорتنих ЕРВ.

1.8 Короткий аналіз наукових робіт з моделями експлуатації та технічного обслуговування складних систем

1.8.1 Загальні положення

Теоретичні питання експлуатації і технічного обслуговування складних систем розглядали 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, методів, алгоритмів зробили вчені: Барзилович В.А., Бикадоров А.К., Беляєв Ю.К., Богомья В.І., Гнеденко Б.В., Герцбах І.Б., Гриб Д.А., Дружинин Г.В., Дедков В.К., Ігнатов В.О., Іцкович А.А., Конахович Г.Ф., Креденцер Б.П., Кульбак Л.Н., Коваленко І.Н., Каштанов А.В., Королюк В.С., Кузнецов В.Н., Кіриллюк А.С., Кірилова Н.А., Ленков С.В., Ланецкий Б.Н., Лук'янчук В.В., Мачалін І.О., Машков О.Є., Орловській 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., Сотсков В.С., Северцев Н.А., Цицарев В.Н., Черкесов Г. Н., Широков О.М., Уланський В.В., Ушаков І.А.

[5-11, 16, 21, 25, 29, 45, 49, 50, 51, 62- 64, 104, 109 -121, 125-128, 130-134, 136 - 138, 143, 146, 149-151, 155, 157, 160, 165-173, 220 - 221].

1.8.2 Основні стратегії та завдання технічного обслуговування і ремонту технічних об'єктів

Визначення завдань і стратегій технічного обслуговування (ТО) і ремонту (Р) технічних об'єктів за фактичним станом представлена в роботах [6-10, 49-51, 53, 59-64].

Найбільш широко теорія і практика ТО за фактичним станом розвивалася і впроваджувалася при розробці, виготовленні та експлуатації авіаційної техніки [15, 16, 162-163].

Стратегія ТО і Р авіаційної техніки (АТ) – сукупність прийнятих принципів, правил і керуючих впливів, що визначають комплексний розвиток експлуатаційних властивостей конструкції АТ, методів організації та виробничо-технічної бази її ТО і Р.

Відповідно до діючих стандартів розрізняють такі стратегії:

- технічного обслуговування за наробітком, при якій перелік і періодичність виконання операцій визначаються значенням наробітку виробу з початку експлуатації або після капітального (середнього) ремонту;

- технічного обслуговування за станом, при якій перелік і періодичність виконання операцій визначаються фактичним технічним станом виробу в момент початку технічного обслуговування;

- ремонту за наробітком, при якій обсяг розбирання виробу і дефектації його складових частин призначається єдиним для парку однотипних виробів в залежності від наробітку з початку експлуатації і (або) встановлення визначається з урахуванням результатів дефектації складових частин виробу;

- ремонту за технічним станом, при якій перелік операцій, в тому числі розбирання, визначається за результатами діагностування виробу в момент

початку ремонту, а також за даними про надійність цього виробу та однотипних виробів.

Таблиця 1.10

Стратегії ТО і Р авіаційної техніки

Характер інформації	Апріорна	Апостеріорна
Про сукупності об'єктів	За наробітком	За станом з контролем рівня надійності
По окремому об'єкту	За наробітком, встановленому для окремого об'єкту	За станом з контролем параметрів

У якості основної ознаки, що характеризує стратегії ТО і Р авіаційної техніки, приймається характер інформації про їх надійності та технічному стані, яка використовується при призначенні періодичності обсягу регламентних робіт. Цю інформацію можна розділити:

- за часом отримання і використання на апріорну (отриману до досвіду) і апостеріорну (отриману при проведенні досвіду);
- за джерелами отримання інформації про сукупність об'єктів і про окремий об'єкт.

При цьому під досвідом розуміється експлуатація об'єкта. Сполучення цих видів інформації утворюють чотири стратегії ТО і Р АТ (табл.1.10).

Залежно від наявних можливостей визначення граничного стану працездатності виробів у процесі експлуатації і від прийнятого критерію для встановлення термінів їх заміни розрізняють наступні стратегії експлуатації (використання): до вироблення ресурсу (терміну служби); до відмови; до передвідмовного стану. Стратегії обслуговування і ремонту, пов'язані зі стратегіями експлуатації (використання) виробів АТ (табл. 1.11). Для кожної

із стратегій експлуатації можна вибрати цілком певні, що відрізняються найбільшою ефективністю стратегії ТО і Р (позначені знаком +).

З таблиці 1.11 випливає, що для стратегії експлуатації виробів до вироблення ресурсу (терміну служби) найбільш ефективною стратегією технічного обслуговування буде стратегія за наробітком.

При ремонті виробів можливі стратегії щодо наробітку і за технічним станом, що залежить від виду виробів і рівня його контролепридатності при ремонті. Якщо ж для виробу прийнята стратегія експлуатації до передотказового стану, то необхідною і обов'язковою умовою її здійснення на практиці є прийняття стратегії обслуговування даного виробу за станом з контролем параметрів і стратегії ремонту за технічним станом.

Таблиця 1.11

Взаємозв'язок стратегій експлуатації та ТО і Р АТ

Стратегія ТО і Р	Стратегія експлуатації (використання)		
	До вироблення ресурсу (терміну служби)	До перед відмовного стану	До відмови
1	2	3	4
Технічне обслуговування			
За наробітком	+	-	+
За станом з контролем параметрів	+	+	-
За станом з контролем рівня надійності	-	-	+
Ремонт			
За наробітком	+	-	+
За технічним станом	+	+	+

Якщо ж, навпаки, той чи інший виріб обслуговується і ремонтується з контролем параметрів, то найбільш ефективною стратегією експлуатації (використання) такого виробу виявиться стратегія до передвідмовного стану.

Відповідно для виробів, що експлуатуються за стратегією до відмови, найбільш ефективними стратегіями ТО і Р будуть: при обслуговуванні - стратегія за станом з контролем рівня надійності, при ремонті можливі стратегії за наробітком та технічним станом. Звідси випливає, що окремі вироби, встановлені на сучасних літаках, можна експлуатувати, обслуговувати і ремонтувати, як правило, тільки по одній із зазначених стратегій. Для функціональних систем і літака в цілому найбільш ймовірно застосування всіх, зазначених у табл. 1.11 стратегій експлуатації або так званої змішаної стратегії.

До характерних особливостей стратегії обслуговування з контролем рівня надійності можна віднести наступні. Кожен з виробів при цій стратегії експлуатується (використовується) до відмови. Міжремонтних ресурсів для цих виробів не встановлюється. Технічне обслуговування кожного конкретного виробу полягає у виконанні необхідного обсягу робіт з регулювання, калібрування, виявлення відмов і несправностей, які виникли і їх усунення. Для конструктивно складних виробів може виявитися доцільним виконувати заміну деяких з їх складових частин за наробітком, якщо вона можлива без необхідності розбирання виробу в стаціонарних умовах.

В усіх парках однотипних виробів здійснюється контроль рівня надійності. У випадках коли фактичний рівень надійності того чи іншого типу виробів нижче нормативного, проводиться ретельний аналіз причин відхилення і здійснюються заходи щодо його підвищення.

Сфера застосування даної стратегії обслуговування обмежується виробами:

- відмови яких не впливають на безпеку польоту, що встановлюється на підставі аналізу надійності систем при виборі і призначення стратегій технічного обслуговування;
- для яких має місце експоненціальний розподіл імовірності безвідмовної роботи;
- надійність яких дозволяє забезпечити виконання вимог по регулярності польотів і економічності ефективності процесу технічної експлуатації літака;
- володіють високою експлуатаційною технологічністю, у тому числі легкознімністю, доступністю, взаємозамінністю;
- витрати на експлуатацію яких до відмови (при обслуговуванні з контролем рівня надійності) не перевищують витрат на планово-профілактичне технічне обслуговування;
- мають індикацію відмов бортовими або наземними засобами контролю з мінімальними трудовими затратами в заданий час.

Стратегія технічного обслуговування АТ за станом з контролем рівня надійності

Отримала найбільш широке застосування для виробів функціональних систем літаків, зокрема для систем кондиціонування повітря і регулювання тиску, систем протиобледеніння, гідравлічної і паливної систем, агрегатів силової установки.

Контроль рівня надійності сукупності однотипних виробів здійснюється статистичними методами. Таким видом контролю охоплюється, як правило, більшість агрегатів і вузлів не залежно від застосованої до них стратегії ТО і Р. Однак тільки для стратегії технічного обслуговування з контролем рівня надійності цей вид контролю є основним механізмом в управлінні надійністю виробів.

За такої стратегії обслуговування критерієм технічного стану совокупності однотипних виробів систем літаків є рівень надійності, що виражається відповідним показником. Такий показник повинен нести максимум інформації про технічний стан виробів, бути зручним для проведення оперативного порівняльного аналізу, а також бути критичним до змін процесу технічної експлуатації парку літаків (зміни умов експлуатації, рівня відновлення функціональних систем). Найбільш повно таким вимогам в умовах експлуатації АТ відповідають такі показники: параметр потоку відмов і число відмов виробів, що припадають на 1000 год. нальоту.

Рівень надійності сукупності однотипних виробів контролюють шляхом порівняння числа спостереження відмов з верхньою межею регулювання (ВМР), що представляє собою допустиму кількість відмов.

Число спостереження відмов в певні інтервали часу має випадковий характер від нуля до ВМР. Значення ВМР визначається з використанням розподілу Пуассона. Для визначення ВМР потрібно знати значення імовірності того, що випадкове число відмов не перевищить верхньої межі. Воно зазвичай встановлюється виходячи з економічних міркувань. Наявність на сучасних літаках різних видів резервування окремих виробів і функціональних систем не виключає необхідності своєчасного усунення відмов. У закордонній практиці, наприклад, для визначення ВМР беруть значення 0,975. Це означає, що випадковий викид за верхню межу може статися з імовірністю 0,025, що вважається малоімовірним, і тому в разі перевищення числа спостереження відмов ВМР передбачається наявність невідповідних причин. Для їх усунення потрібно розробити і здійснити конкретні заходи. Таким чином, якщо число відмов (замін) виробів за контрольний період перевищує верхню межу, то це служить сигналом про зниження їх надійності. Крім того, визначається тенденція зміни показника надійності, обчисленого для контрольного періоду заданої тривалості, що включає поточний місяць.

Стратегія ТО і Р за станом з контролем параметрів АТ

Являє собою сукупність правил щодо визначення режиму і регламенту діагностування виробів і прийняття рішень про необхідність їх обслуговування, заміни або ремонту на основі інформації про фактичний технічний стан. За такої стратегії ТО і Р вироби і системи літака експлуатуються (використовуються) до передвідмовного стану.

Для виявлення передвідмовного стану виробів може використовуватися принцип призначення випереджувальних допусків на діагностичні параметри. При цьому під випереджувальним допуском розуміють сукупність значень параметрів, укладених між граничним і передвідмовним рівнями параметра. Вихід параметра за граничний рівень означає відмову. Досягнення передвідмовного рівня означає необхідність виконання профілактичних робіт або заміни виробів. Реалізація стратегій ТО і Р за станом з контролем параметрів вимагає встановлення кількісних зв'язків між значеннями попереджувальних допусків на кожен з контрольованих параметрів виробу та періодичністю їх перевірок.

1.8.3 Огляд робіт за моделями оптимального технічного обслуговування систем і обслуговування за фактичним станом

За останні роки дослідниками тривала розробка та дослідження моделей оптимального ТО і ремонту для різних видів цивільної і військової техніки [113, 130, 131, 133 – 135, 138, 139, 169-171] обслуговування радіоелектронних пристроїв за станом з адаптивним контролем параметрів. У роботі [139] показано впровадження принципу попереджувального технічного обслуговування повітряних суден, розглядаються різні стратегії ТО обладнання. В роботі [130,133] розглянуто задачу відшукування раціональної

стратегії технічного обслуговування для складних систем, елементи яких функціонують в різних умовах. У роботі [16] розглядається математична модель процесу адаптивного технічного обслуговування за станом складної електронної техніки. У роботі [134] представлено формалізовану математичну модель процесу адаптивного технічного обслуговування за станом, яка використовується при імітаційному моделюванні. У роботах авторів Б.М. Ланецького, В.В. Лук'янчук, Д.В. Фоменко [131, 133, 134] представлено обґрунтування можливості застосування оптимальних стратегій технічного обслуговування і ремонту складних технічних систем. У роботі розглядаються питання побудови програми технічного обслуговування і ремонту складних технічних систем (СТС) на основі змішаної стратегії технічного обслуговування і ремонту. Вводиться поняття оптимальної стратегії технічного обслуговування і ремонту СТС, при якій забезпечується найб/ільш тісний контакт між процесом зміни технічного стану СТС і процесом її технічної експлуатації. Формулюється оптимізаційна задача призначення стратегії технічного обслуговування і ремонту СТС, пропонується підхід до її вирішення.

В роботі авторів Б.М. Ланецького, В.В. Лук'янчук, Н.І. Кирилової, А.А. Артеменко [131] розробляється модель оцінювання вартості експлуатації складних технічних систем для обґрунтування вибору методу їх експлуатації. Окрім загальних положень щодо формування моделі оцінювання розглянуті основні розрахункові співвідношення. Аналізуються основні чинники, які суттєво впливають на економічну ефективність методів експлуатації.

В роботі авторів С.В. Ленкова, А.В. Селюкова, В.В. Зубарева, В.Н. Цицарева [133,134] запропоновані методика і алгоритм вирішення задачі визначення оптимальних параметрів технічного обслуговування за станом складних об'єктів радіоелектронної техніки. Завдання оптимізації ставиться як задача мінімізації питомої вартості експлуатації об'єкта при заданому обмеженні на мінімально допустимий рівень безвідмовності об'єкта. У якості

оптимізує параметрів процесу технічного обслуговування за станом прийняті:

- 1) безліч елементів об'єкта, що обслуговуються;
- 2) рівні гранично допустимих значень визначальних параметрів елементів, що обслуговуються;
- 3) періодичність контролю технічного стану об'єкта.

Цільові функції завдання – питома вартість експлуатації та середній наробіток на відмову об'єкта виходять за допомогою імітаційної статистичної моделі. Завдання вирішується наближено з використанням розробленого програмного забезпечення. У пошуку оптимального рішення приймає участь в інтерактивному режимі людина-експерт. Наводиться приклад розв'язання задачі. Вирішується методом імітаційного (статистичного моделювання).

1.9 Короткий огляд методів технічного обслуговування радіолокаційних станцій

1.9.1 Основні завдання технічної експлуатації радіолокаційних станцій

Найбільш детально основні завдання, визначення, поняття і особливості експлуатації та технічного обслуговування (ТО) радіолокаційних систем представлені у роботах [21, 45, 49, 54, 63, 107, 147, 168, 177, 180].

1.9.2 Характеристика системи технічного обслуговування та ремонту радіолокаційних станцій

Технічне обслуговування РЛС – операція чи комплекс операцій з підтримки працездатності або справності виробу під час використання за призначенням, очікуванні, зберіганні і транспортуванні [21, 45, 54]. Метою технічного обслуговування є збільшення часу роботи РЛС до відмови або переходу в

граничний стан і зниження тривалості її перебування в непрацездатному стані. Планування технічного обслуговування проводиться з урахуванням економічних критеріїв.

Стратегія технічного обслуговування і ремонту – сукупність принципів, правил і дій, що керують, методів організації та виробничо-технічної бази, що визначаються видом і структурою технічної системи, переважаючим типом відмов (явних або неявних), глибиною відновлення працездатності системи при обслуговуванні (від огляду до заміни елементів, що відмовили) і прийнятим графіком технічного обслуговування.

Серед розроблених стратегій технічного обслуговування в практиці експлуатації різних технічних об'єктів найбільшого поширення набули такі види: календарна, за ресурсом, наробітком, рівнем надійності, станом і комбіновані.

«Жорсткі» стратегії технічного обслуговування (календарна, за ресурсом, наробітком і комбіновані) передбачають проведення робіт через певні календарні відрізки часу або наробіток незалежно від технічного стану об'єкта. Більш прогресивними вважаються «гнучкі» стратегії (за рівнем надійності і станом), при використанні яких обсяг і періодичність виконання робіт з технічного обслуговування визначаються фактичним станом об'єкта – інтенсивністю або частотою відмов, значеннями його основних характеристик (параметрів) тощо. Відповідно при використанні календарної стратегії графік технічного обслуговування і ремонту може надаватися незалежно від того, чи відбулися відмови в попередньому періоді. В цьому випадку технічне обслуговування або ремонт призначаються в певні календарні терміни (календарне технічне обслуговування). В протилежному випадку після відмови графіки технічного обслуговування і ремонту перебудовуються. Для деяких технічних систем обслуговування проводиться при досягненні їх параметрів, визначених регламентованих значень (регламентне технічне обслуговування). Найбільш гнучкою і досить універсальною є планово-

попереджувальна система технічного обслуговування або ремонту, що об'єднує жорстке планування з проведенням робіт, які залежать від технічного стану обладнання.

Система технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) – комплекс організаційних і технічних заходів з обслуговування та ремонту обладнання [63]. Система ТО і Р включає планування, підготовку, реалізацію ТО і Р з заданими послідовністю і періодичністю. Для цих цілей система ТО і Р повинна передбачати нормативи тривалості міжремонтних періодів, ремонтних циклів, ремонтів і технічного обслуговування, трудомісткості ремонтів, приблизний зміст ремонтних робіт, вказівки по організації ремонту і технічного обслуговування. Система ТО і Р повинна забезпечувати підтримку об'єктів в працездатному стані і запобігання їх відмов, оптимальну організацію технічного обслуговування і ремонту, збільшення коефіцієнта технічного використання об'єкта за рахунок підвищення якості ТО і Р та зменшення простоїв, можливість виконання ремонтних робіт відповідно до графіка використання об'єкта за призначенням, своєчасну підготовку необхідних запасних частин і матеріалів. Система ТО і Р поєднує систему технічного обслуговування і систему планово-попереджувальних ремонтів. Технічне обслуговування призначені для підтримки працездатності об'єкта між ремонтами. Як правило, передбачається щозмінне і періодичне технічне обслуговування.

Щозмінне технічне обслуговування є основним профілактичним заходом, покликаним забезпечити надійну роботу об'єкта між ремонтами. Щозмінне технічне обслуговування проводиться, як правило, без зупинки технологічних процесів. Періодичне технічне обслуговування виконується з урахуванням встановлених в нормативно-технічній документації значень наробітку або через встановлені інтервали часу. Основним призначенням періодичного технічного обслуговування є усунення дефектів, які не можуть бути виявлені або усунуті в період роботи об'єкта. Для безперервних технологічних процесів

періодичне технічне обслуговування проводиться під час планово-періодичних зупинок, для інших об'єктів – в період знаходження в резерві або в неробочий період.

Ремонт – комплекс заходів з відновлення справності або працездатності та ресурсу станції. Залежно від виду та значимості об'єкта і прийнятої стратегії технічного обслуговування РЛС система планово-попереджувальних ремонтів будується з планово-періодичних ремонтів або з ремонтів за технічним станом. Суть планово-попереджувального ремонту полягає в тому, що всі види ремонту плануються і виконуються в установлені терміни. Суть ремонту за технічним станом полягає в тому, що всі види і терміни ремонту встановлюються в залежності від технічного стану об'єкта, що визначається при періодичному технічному обслуговуванні. Залежно від виду і особливостей пошкоджень і відмов, зносу елементів об'єкта, а також складності і трудомісткості ремонтних робіт система ТО і Р може передбачати проведення поточного та капітального ремонту. Поточний ремонт виконується для забезпечення або відновлення працездатності об'єкта та ґрунтується, як правило, на заміні або відновленні його окремих вузлів і деталей. Капітальний ремонт виконується для відновлення справності та повного або часткового відновлення ресурсу об'єкта із заміною або відновленням будь-яких його частин, включаючи базові. При капітальному ремонті проводиться часткове, а в разі потреби повне розбирання об'єкта.

Система ТО і Р передбачає встановлення структури ремонтного циклу і міжремонтного періоду. Ремонтний цикл - це найменший повторюваний період експлуатації, протягом якого здійснюються в певній послідовності встановлені види технічного обслуговування і ремонту, передбачені системою ТО і Р. Міжремонтний період - час роботи обладнання між двома послідовно проведеними ремонтами. Структура ремонтного циклу відображає чергування передбачених видів ремонту в певній послідовності через певні проміжки часу.

Впровадження система ТО і Р радіотехнічних систем по фактичному стану в експлуатацію знайшло своє відображення в навчальних посібниках військових вузів. Огляд зазначених вище робіт по ТО і Р показав, що дослідниками США, Китаю, України та Росії ставляться і вирішуються теоретичні завдання оптимального ТО та експлуатації за фактичним станом різних пристроїв. Однак практичні рекомендації з проведення ТО і ремонту за станом сучасних радіотехнічних систем наводяться тільки російськими авторами. У тому числі відсутні публікації з дослідження показників надійності та технічного обслуговування морських і наземних РЛС з АФАР типу Aegis, Patriot, Meads, ТНААД. Це викликано специфікою застосування військових РЛС з АФАР і конфіденційністю інформації про ці системи.

1.10 Постановка завдань дослідження

При вирішенні наукової проблеми підвищення ефективності системи технічного експлуатації РЛС з АФАР повинні бути вирішені наступні завдання:

- розроблення математичних моделей надійності каналів і модулів, які формують АФАР;
- визначення і дослідження критеріїв відмов і математичних моделей надійності АФАР РЛС при різних типах відмов каналів і модулів антенної решітки;
- розроблення моделей оптимального ТО АФАР на період гарантійного технічного обслуговування;
- розроблення стратегій і методів технічної експлуатації АФАР на період післягарантійного технічного обслуговування;
- розроблення методів визначення кількості запасних каналів модулів АФАР для забезпечення заданого ресурсу РЛС.

З проведеного огляду випливає, що зазначені вище завдання вирішувалися

іншими авторами недостатньо повно з низкою суттєвих недоліків:

1. При оцінці показників надійності АФАР враховувалися тільки раптові відмови модулів і вузлів і не враховувалися поступові відмови, хоча відомо що причиною близько п'ятдесяти відсотків відмов НВЧ транзисторів і джерел вторинного живлення є поступові відмови.

2. В якості критерію відмови аналогової АФАР проф. А. К. Агравалом використовувався тільки один критерій – допустимого погіршення рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості антенної решітки, а інші критерії відмов не розглядалися. Модель надійності АФАР, запропонована проф. А.К. Агравалом, є наближеною, оскільки апроксимується найпростішим експоненціальним законом розподілу відмов та враховує тільки раптові відмови модулів. Однак модель надійності АФАР (як системи з надлишковою структурою) повинна описуватися розподілом відмов, який враховує також поступові відмови модулів. Використання експоненціального розподілу відмов як моделі надійності АФАР може призводити до великих похибок при оцінці показників надійності АФАР.

3. Іншими авторами наукових робіт розглядалася найпростіша модель з однорівневою структурною схемою надійності і при цьому визначався тільки середній наробіток до відмови АФАР.

4. Відсутні роботи по методам оптимального ТО і обслуговування за станом РЛС з АФАР.

5. Відсутні методи визначення показників технічного стану АФАР в період гарантійного і післягарантійного обслуговування.

На основі цього огляду і аналізу, можна сформулювати такі завдання дисертаційної роботи:

- вибір визначальних параметрів і визначення критеріїв відмов АФАР РЛС;
- розроблення методу побудови математичних моделей надійності каналів і модулів АФАР, що адекватно відображає статистичну довідкову інформацію про раптові і поступові відмови електрорадіовиробів;

- розроблення методу побудови математичних моделей надійності АФАР з багаторівневою структурною схемою надійності;
- розроблення математичної моделі надійності АФАР передавальної і приймально-передавальної РЛС, що працює на передачу, за критерієм допустимого зниження рівня максимальної дальності РЛС;
- розроблення математичної моделі надійності АФАР приймальної і приймально-передавальної РЛС, що працює на прийом, за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток;
- визначення показників ефективності ТО і розроблення математичної моделі оптимізації технічного обслуговування АФАР для використання в період гарантійного обслуговування РЛС;
- розроблення стратегій і методів ТО за фактичним технічним станом АФАР для використання в період післягарантійного обслуговування РЛС;
- розроблення методу визначення кількості запасних вузлів і модулів для забезпечення ТО АФАР за фактичним технічним станом.

Список публікацій здобувача за матеріалами першого розділу

1. 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 ОВТ ЗСУ, м. Київ. С. 153-154.*

2. 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.*

3. Костановский 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.*

4. 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 и перспективи», НТУ «Київський політехнічний інститут». Приладобудівний факультет. 23-24 квітня 2013 р., м. Київ, Україна, С. 63-64.*

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

6. Костановский В.В., Баглай Г.Р. Планирование отработки 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.*

7. 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.

8. 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.

9. 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.

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

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

12. Стандарт підприємства. СТП ФИЯЕ.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.

13. Пояснювальна записка до технічного проекту 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.

14. 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.

РОЗДІЛ 2.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК У ПРОЦЕСІ ПРОЕКТУВАННЯ

2.1 Постановка завдання

У процесі проектування АФАР необхідно оцінювати показники безвідмовності і довговічності каналів, модулів і антенної решітки в цілому. Для цього доцільно застосування методу системного аналізу електронних пристроїв. Під системним аналізом показників надійності електронних пристроїв розуміється визначення імовірнісних характеристик надійності електрорадіовиробів, які формують даний пристрій, і визначення ступеня їх впливу на характеристики надійності цього пристрою.

У другому розділі буде вирішуватися завдання системного аналізу надійності електронних модулів.

2.2 Завдання, які вирішуються в процесі системного аналізу надійності електронних модулів

2.2.1 Вибір математичної моделі надійності електронного модуля, визначення режимів роботи модуля, умов застосування і параметрів навколишнього середовища [73, 77, 94].

2.2.2 Визначення статистичних даних про відмови електрорадіовиробів (ЕРВ) з урахуванням режимів роботи електронного модуля і коефіцієнтів жорсткості навколишнього середовища:

- про значення експлуатаційних інтенсивностей (раптових і поступових) відмов ЕРВ, що входять до складу електронного модуля - $\lambda_{ЕРВ_i}, i = \overline{1, S}$;

- про розподіл раптових і поступових відмов ЕРВ за видами

$$\lambda_{\text{ЕРВ}_i\text{РАПТ.}} (\%), i = \overline{1, s};$$

- про значення показників довговічності ЕРВ: мінімального наробітку - $t_{\text{н.м.}_i}$ і гамма-відсоткового ресурсу T_{γ_i} .

2.2.3 Визначення значень показників безвідмовності електронного модуля:

- імовірності безвідмовної роботи модуля – $P_{\text{МОД.}}(t)$;

- середнього наробітку до відмови (середнього ресурсу) модуля - $T_{0\text{МОД.}}$.

Визначення значень показників довговічності електронного модуля:

- гамма-відсоткового ресурсу модуля -- $T_{\gamma\text{МОД.}}$ ($\gamma = 0,95; 0,90; 0,85$);

- середнього ресурсу модуля - $T_{p\text{МОД.}}$

($\gamma = 0,368$ – для експоненціального розподілу; $\gamma = 0,332 \div 0,500$ – для інших розподілів).

Визначення коефіцієнтів впливу i -го ЕРВ на надійність модуля в

$$\text{цілому} - KV_i(T_{\gamma\text{МОД.}}), i = \overline{1, s}.$$

2.3 Системний аналіз безвідмовності і довговічності електронного модуля

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

$$P_{\text{МОД.}}(t) = \prod_{i=1}^N [P_{\text{ЕРВ}_i}(t)]^{n_i}, \quad (2.1)$$

де n_i - кількість елементів i -го типонаміналу ЕРВ.

Для проведення системного аналізу надійності електронного модуля використовуються три моделі надійності: експоненціальний розподіл (ЕР) і дві

композиції розподілів: композиція експоненціального і розподілу Вейбулла (ЕР×ВР) та композиція експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів (ЕР×ДНР).

Аналітичні вирази ІБР електрорадіовиробів для зазначених вище розподілів мають вигляд:

- для експоненціального розподілу:

$$P_{\text{ЕРВЕР}}(t) = \exp(-\lambda_{\text{ЕРВРАПТ}} \cdot t), \quad (2.2)$$

- для композиції експоненціального и Вейбулла розподілів:

$$P_{\text{ЕРВЕР} \times \text{WR}}(t) = \exp\left\{-\left[\lambda_{\text{ЕРВРАПТ}} \cdot t + \left(\frac{b_m t}{T_{0,WR}}\right)^m\right]\right\}, \quad (2.3)$$

- для композиції експоненціального и дифузійного немонотонного розподілів:

$$P_{\text{ЕРВЕР} \times \text{DNR}}(t) = \exp(-\lambda_{\text{ЕРВРАПТ}} \cdot t) \left[\Phi\left(\frac{T_{0,DNR}-t}{\sqrt{T_{0,DNR}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0,DNR}+t}{\sqrt{T_{0,DNR}t}}\right) \right] \quad (2.4)$$

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

$$\gamma = \prod_{i=1}^N [P_{\text{ЕРВ}_i}(T_\gamma)]^{n_i} \quad (2.5)$$

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

$$T_{0,MOD} = \int_0^\infty \prod_{i=1}^N [P_{\text{ЕРВ}_i}(t)]^{n_i} dt \quad (2.6)$$

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:

$$KV_i(T_\gamma) = \frac{n_i \ln P_{EPB_i}(T_\gamma)}{\ln P_{ER_MOD}(T_\gamma)} 100\% , i = \overline{1, N} \quad (2.7)$$

Для експоненціального закону розподілу коефіцієнти впливу визначаються за формулою:

$$KV_i(T_\gamma) = \frac{n_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^S n_i \lambda_i} , i = \overline{1, N} \quad (2.8)$$

2.4 Приклад системного аналізу безвідмовності і довговічності електронного модуля

Вихідні дані для системного аналізу (прогнозування) безвідмовності і довговічності електронного модуля представлені в табл. 2.

Таблиця 2.1

Вихідні дані для системного аналізу надійності електронного модуля

Найменування ЕРВ	Кількість, n_i	Інтенсивність відмов, $\lambda_{ER} \times 10^6$, 1/год	% рапто-вих відмов	% поступо-вих відмов	Міні-мальні наро-біток, $t_{н.м.}$ год	Гамма-процент-ній ресурс, T_γ , год
1	2	3	4	5	6	7
Конденсатор К53-18А	3	0,138	44	56	45	90
Конденсатор К10-17	4	0,024	41	59	25	150
Резистор С2-29В, 274 Ом	4	0,04227	5	95	25	105

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7
Резистор С2-29В, 274 кОм	10	0,0791	5	95	25	105
Резистор СП5-2ВБ, 1,5 Ом	1	0,01457	83	17	20	80
Транзистор 2Т3130А-5	1	0,0952	20	80	60	100
Вилка ГРПМ1-90ШУ2	1	0,01114	95	5	5	100
Мікросхема 533ТЛ2, 1533ЛН1, 585РІ1	16	0,04428	50	50	25	200
Друкована плата, друковані пайки	2	0,200	5	95	25	200

У таблиці 2.2 представлені результати розрахунку середнього наробітку до відмови електронного модуля для трьох математичних моделей надійності: експоненціального розподілу (ЕР) і композиції розподілів - ЕР×ДНР і ЕР×ВР.

Таблиця 2.2

**Середній наробіток до відмови електронного модуля
для трьох моделей надійності**

Тип розподілу Найменування ЕРВ	Середній наробіток до відмови, год			Коефіцієнти розподілів	
	ЕР	ЕР×ВР	ЕР×ДНР	форми m для ЕР×ВР	варіації ν для ЕР×ДНР
1	2	3	4	5	6
Конденсатор К53-18А	7246377	185931	656020	3,72	1,16

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6
Конденсатор К10-17	41666667	395636	473570	2,76	0,65
Резистор С2-29В, 274 Ом	23657440	276628	418176,7	2,74	0,79
Резистор С2-29В, 274кОм	12642225	339867	384636	2,30	0,74
Резистор СП5- 2ВБ	68634180	133620	461669,8	4,99	1,04
Транзистор 2Т3130А-5	10504201	203496	693066,9	3,70	1,16
Вилка ГРПМ1- 90ШУ2	89766607	223805	145401	3,27	0,22
Мікросхема 533Л2, 1533ЛН1, 585РІ1	22583559	743227	449879,5	2,13	0,45
Друкована плата, друковані пайки	5000000	2813100	334546,3	1,13	0,29

На рис. 2.1 представлені імовірності безвідмовної роботи електронного модуля для трьох розподілів: EP , $EP \times VP$ і $EP \times ДНР$

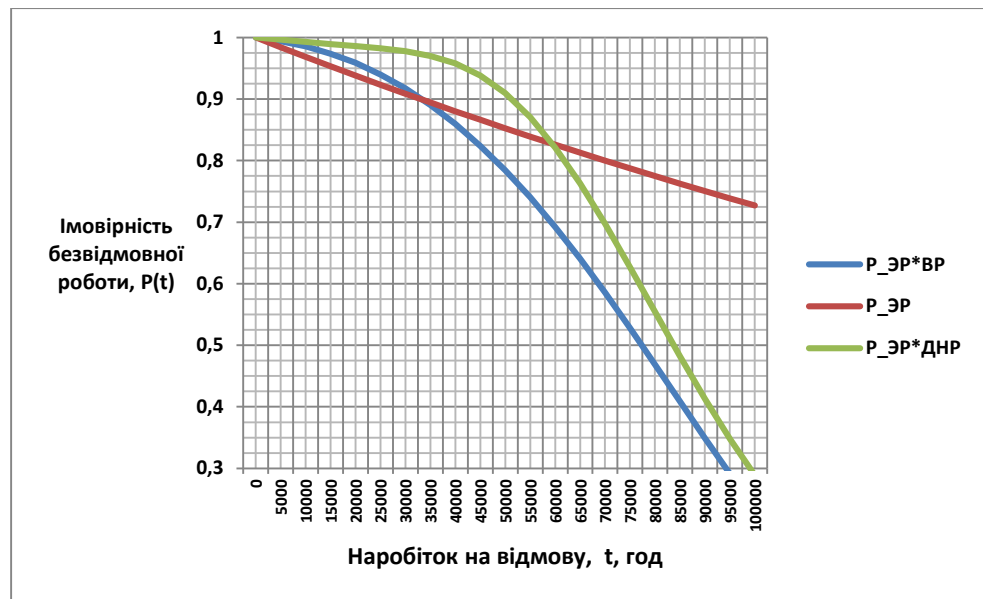


Рис. 2.1 Імовірність безвідмовної роботи електронного модуля при різних розподілах наробітку EPB : експоненціальному - EP ; композиції розподілів: експоненціального і Вейбулла - $EP \times VP$; композиції розподілів: експоненціального і дифузійного немонотонного - $EP \times ДНР$.

У таблиці 2.3 представлені результати розрахунку гамма-відсоткового ресурсу електронного модуля для трьох розподілів: EP , $EP \times VP$ і $EP \times ДНР$.

Таблиця 2.3

Результати розрахунку гамма-відсоткового ресурсу електронного модуля для трьох розподілів: EP , $EP \times VP$ і $EP \times ДНР$.

Імовірність EPB	Гамма-відсотковий ресурс T_γ						
	$\gamma = 0,99$	$\gamma = 0,98$	$\gamma = 0,95$	$\gamma = 0,90$	$\gamma = 0,368$	$\gamma = 0,332$	$\gamma = 0,480$
$P(t)_{EP}$	3747	7532	19125	39284	372856	-	-
$P(t)_{VP}$	7664	12628	22431	32919	-	-	76243
$P(t)_{EP \times ДНР}$	14407	27857	43508	53274	-	98322	-

У таблиці 2.4 представлені результати розрахунку коефіцієнтів впливу ЕРВ електронного модуля для трьох розподілів: ЕР, ЕР×ВР і ЕР×ДНР.

Таблиця 2.4

Результати розрахунку коефіцієнтів впливу ЕРВ електронного модуля для трьох розподілів: ЕР, ЕР×ВР і ЕР×ДНР

Найменування ЕРВ	Коефіцієнт впливу $KV_i(T_{\gamma=0,9})$, %		
	Тип розподілу		
	ЕР	ЕР×ВР $T_{\gamma=0,9}=32919$ год.	ЕР×ДНР $T_{\gamma=0,9}=53724$ год.
1. Конденсатор К53-18А	15,43	8,804	26,48
2. Конденсатор К10-17	3,58	4,115	2,14
3. Резистор С2-29В, 274 Ом	6,30	8,379	7,54
4. Резистор С2-29В, 274 кОм	29,49	34,77	17,21
5. Резистор СП5-2ВБ	1,09	1,893	22,34
6. Транзистор 2Т3130А-5	3,55	1,364	4,83
7. Вилка ГРПМ1-90ШУ2	0,42	1,594	0,54
8. Мікросхема 533Л2, 1533ЛН1, 585РІ1	25,22	26,277	17,91
Друкована плата, друковані пайки	14,91	12,805	1,01

Виконаний системний аналіз безвідмовності електронного модуля показав (рис.1), що:

а) для композиції розподілів $EP \times VP$ значення ІБР в період часу від 0 до 25 000 год перевищують значення ВБР для експоненціального розподілу;

б) для композиції розподілів $EP \times ДНР$ значення ІБР в період часу від 0 до 55 000 год перевищують значення ІБР для експоненціального розподілу.

Системний аналіз довговічності електронного модуля показав (табл. 3), що:

а) значення гамма-відсоткового ресурсу (при $\gamma = 0,95$) для композиції розподілів $EP \times VP$ становить $= 22\ 431$ год, для композиції розподілів $EP \times ДНР$ $= 43\ 508$ год, що значно перевищує значення гамма-відсоткового ресурсу для експоненціального розподілу $= 19\ 125$ год;

б) значення гамма- відсоткового ресурсу (при $\gamma = 0,90$) для композиції розподілів $EP \times VP$ становить $= 32\ 919$ год, для композиції розподілів $EP \times ДНР$ $= 53\ 274$ год, що значно перевищує значення гамма- відсоткового ресурсу для експоненціального розподілу $= 39\ 284$ год.

Системний аналіз коефіцієнтів впливу ЕРВ показав, що для моделі $EP \times VP$ найбільший вплив на надійність електронного модуля мають резистори С2 - 29В (274 кОм) і мікросхеми 533Л2, 1533ЛН1, 585Р11 .

2.5 Висновки до другого розділу

1. Найбільш перспективною математично. моделлю для апроксимації реальної (статистичної) імовірності безвідмовної роботи ЕРВ при системному аналізі надійності електронних модулів є композиція експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів (модель $EP \times ДНР$).

2. Використання математичної моделі $EP \times ДНР$ при системному аналізі надійності електронних модулів на основі статистичних даних по відмовах ЕРВ дозволяє визначати більш точні (значні) оцінки показників

безвідмовності і довговічності модулів, ніж просте використання експоненціального розподілу.

3. Застосування моделі ЕР×ДНР при системному аналізі надійності структур АФАР дозволяє визначати реальні показники безвідмовності і довговічності структур АФАР і потрібну кількість запасних частин при експлуатації АФАР.

4. Обчислення коефіцієнтів впливу кожного ЕРВ на надійність електронного модулю в цілому дозволяє визначити комплексний внесок кожного ЕРВ на показники ефективності модуля в цілому.

Список публікацій здобувача за матеріалами другого розділу

1. 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). P. 59-67.

2. 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.

3. 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.

4. 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 системи»*. №2, 2014. С. 142-150.

5. 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.

6. Пояснювальна записка до технічного проекту 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.

7. 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.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАДІЙНОСТІ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ, ЩО НЕ ОБСЛУГОВУЮТЬСЯ

3.1 Постановка завдань

У третьому розділі буде представлена характеристика приймально-передавальної АФАР РЛС, яка досліджується у дисертаційній роботі. В підрозділах 3.2 – 3.7 будуть визначені критерії відмов, розроблений метод побудови математичних моделей надійності АФАР з k – рівневою структурною схемою надійності, розроблені і досліджені математичні моделі надійності приймально-передавальної АФАР, що не обслуговується:

- 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.

В підрозділі 3.8 буде представлений доказ адекватності математичної моделі розрахунку надійності АФАР, яка представлена у роботі, по відношенню до класичної моделі розрахунку надійності резервованої невідновлювальної структури з навантаженим ковзаючим резервом.

3.2 Коротка характеристика приймально-передавальних активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій, які досліджуються у дисертаційній роботі

3.2.1 Приймально-передавальна активна фазована антенна решітка, яка досліджується в дисертаційній роботі

РЛС призначена для посилення зондуючих сигналів до необхідного високого рівня потужності випромінювання їх в заданому напрямку, прийому відбитих від цілей ехосигналів, а також для практично безінерційного 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 (АППМ);
- одного приймально-передавального модуля підрешітки (ППМП);
- одного НВЧ дільника / суматора 1:16;
- 200 модулів вторинного електроживлення (МВЖ);
- розподільної системи розподілу потужності зондуючого сигналу;
- розподільної системи розподілу потужності сигналу 1-го гетеродина;
- розподільної системи розподілу потужності сигналу 2-го гетеродина;
- внутрішньоприладної частини системи рідинного охолодження (СРО) АФАР.

3.2.2 Апертура активної фазованої антенної решітки

Апертура АФАР утворюється набором ідентичних випромінювачів, розташованих в одній площині. Розташування випромінювачів в апертурі і форма апертури повинні забезпечувати спільно з пристроями формування діаграм спрямованості (ДС):

- формування ДС із заданою шириною головної пелюстки і заданим рівнем бічних пелюсток (РБП);
- сканування ДС в заданих межах;
- формування багатопробіжних прийомних ДС;
- апертура складається з набору апертур підрешіток.

3.2.3 Апертура підрешіток

Для досягнення заданого сектора кутів сканування у робочому діапазоні частот випромінювачі АФАР розташовуються у вузлах гексагональної сітки, що утворюють набір рівносторонніх трикутників.

3.2.4 Форма апертури активної фазованої антенної решітки і вимоги до діаграм спрямованості

Основні вимоги ДС АФАР наступні:

- в передавальному режимі ДС формується з використанням рівномірного амплітудного розподілу;
- в приймальному режимі формується ДС з низьким, менше - 30 дБ. рівня бічних пелюсток (РБП);
- у приймальному режимі, за допомогою внесення лінійних фазових набігів на виходах підрешіток, формуються багатопробіжні ДС.

Основним з цих вимог, що визначають форму апертури, є вимога отримання низького РБП приймальної ДС. Для досягнення низького РБП за високим коефіцієнтом використання поверхні (КВП) форма апертури повинна бути квазі круглою. У апертурі використовується круговий Тейлоровський амплітудний розподіл. Апертура складається з 100 підрешіток.

АППМ встановлені в АФАР після випромінювачів, виконують посилення НВЧ сигналів, обчислюють і створюють необхідні фазові і амплітудні розподіли. У передавальних каналах модулів посилення створюється потужними транзисторними підсилювачами, в прийомних – малошумовими підсилювачами. Фазовий розподіл створюється НВЧ фазообертачами з цифровим керуванням для установки променя в заданому напрямку. Амплітудний розподіл в приймальному режимі створюється НВЧ атенюаторами з цифровим управлінням.

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

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

До складу кожного ППК входять: керований фазообертач; передпідсилювач передавального і приймального каналів; малошумний підсилювач; підсилювач потужності і джерело вторинного електроживлення.

ППМП призначений для посилення передавального зондуючого імпульсу і передачі його в АППМ в режимі передачі. У режимі прийому в модулі підрешітки здійснюється посилення сигналу, що надходить з приймально-передавальних модулів і перенесення його в проміжний діапазон для подальшої обробки.

Вбудована система контролю і калібрування (ВСКК) АФАР РЛС забезпечує:

- оцінку технічного стану різних елементів в каналах АФАР і обчислювальних пристроях розподілу фаз;
- визначення місця і типу відмов елементів і модулів;
- оцінку інтегральних характеристик і технічного стану АФАР в цілому (контроль технічного стану на системному рівні);
- відстеження змін амплітудно-фазового розподілу і параметрів елементів в каналах АФАР у процесі експлуатації, проведення калібрування АФАР, розрахунок і передачу поправок в систему керування променем для корекції параметрів АФАР на рівні системи.

Надійність АФАР є однією з основних інтегральних характеристик РЛС. Основним завданням багатофункціональної РЛС з АФАР у процесі експлуатації є забезпечення на заданому рівні показників надійності і ефективності. Під час розробки критеріїв відмов АФАР враховується допустиме зниження показників ефективності РЛС при заданому рівні показників надійності АФАР. Значення показників надійності АФАР (імовірність безвідмовної роботи, середній наробіток до відмови, гамма-відсотковий ресурс) визначаються показниками надійності модулів антенних підрешіток. Автоматизоване фіксування системою контролю АФАР значень внутрішніх параметрів модулів дозволяє визначити місце розташування і загальну кількість модулів, що відмовили в антенних підрешітках.

3.3 Визначення критеріїв відмов приймально-передавальних активних фазованих антенних решіток

3.3.1 Загальні положення

Огляд і аналіз науково-технічної літератури показали, що найбільш загальне формулювання для критеріїв відмов будь-якого технічного об'єкта

представлено в ГОСТ 27.103-83 [191] «Критерії відмов об'єктів слід встановлювати за однією відмінною ознакою або за сукупністю ознак непрацездатного стану. Ознаками відмов об'єкта є відхилення заданих показників якості за межі встановлених норм».

Під час розробки математичної моделі надійності АФАР основною умовою вибору критеріїв відмов є знаходження таких показників характеристик, значення яких змінюються у часі і визначаються кількістю працездатних приймально-передавальних каналів (ППК) і модулів. Цій умові відповідають дві характеристики: дальність дії РЛС і рівень бічних пелюсток (РБП) діаграми спрямованості (ДС) антенної решітки. До додаткової характеристики можна віднести також загальну кількість працездатних ППК в антенній решітці.

3.3.2 Максимальна дальність дії радіолокатора

Максимальна дальність дії радіолокатора визначається відповідно до основного рівняння радіолокації [147, 176]:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_{пер.} G_{пер.} G_{пр.} \sigma_{эф.} \lambda^2}{\pi^2 P_{пр.min.}}} \quad (3.1)$$

де: $P_{пер.}$ – потужність, що випромінюється АФАР (випромінювана потужність);

$P_{пр.min.}$ – найменша приймальна потужність (чутливість приймача);

$\sigma_{эф.}$ – ефективна поверхня розсіювання (приймається рівною 1 м^2);

λ – довжина хвилі;

$G_{пер.}$ – коефіцієнт посилення передавальної антени;

$G_{пр.}$ – коефіцієнт посилення приймальної антени.

3.3.3 Рівень бічних пелюсток активних фазованих антенних решіток

Рівень бічних пелюсток (англ. Sidelobe level, SLL) діаграми спрямованості антени – відносний (нормований до максимуму ДС) рівень випромінювання антени в напрямку бічних пелюсток. Як правило, РБП виражається в децибелах, рідше визначають РБП «за потужністю» або «за полем». Бічні пелюстки ДС АФАР характеризують рівень випромінювання і приймання електромагнітної енергії поза основним напрямом (головної пелюстки). Цей недолік антен знижує перешкодозахищеність РЛС і скритність РЛС, а також в ряді випадків може призводити до появи хибних оцінок.

РБП (квантування фазообертачів) для плоскої аналогової АФАР за рівним амплітудним розподілом визначається відповідно до роботи проф. Р.С. Хансена [168] за формулою:

$$q_{\Sigma 0} = \sqrt{\sigma^2 / N} , \quad (3.2)$$

де $\sigma^2 = \frac{\pi^2}{3 \times 4^M}$, M – число розрядів фазообертача

У роботі [176] проф. Д. І. Воскресенського (стор. 37, формула 2.50) рівень придушення комутаційних і комбінаційних бічних пелюсток (SLL) ДС за рівним амплітудним розподілом для плоскої прямокутної решітки має наступний вигляд:

$$q_{\Sigma} = 2 / (M \sqrt{NQ}) \quad (3.3)$$

де M – число стану фазообертача,

$M = 2^p$, p – число керуючих сигналів,

N і Q – число рядків і стовпців у плоскій решітці

У дисертаційній роботі для визначення рівня придушуючих бічних (комутаційних) пелюсток ДС за рівномірним збудженням антенної плоскої решітки використовується формула проф. Р.С. Хансена [168]:

$$q_{\Sigma 0} = \sqrt{(\sigma^2) / N} = \frac{\pi}{2^M \sqrt{3N}} = \frac{\pi}{8\sqrt{3N}} \quad (3.4)$$

або в децибелах $\log(q_{\Sigma}) = \log\left(\frac{\pi}{8\sqrt{3N}}\right)$,

де: $2^M = 2^3$ – число стану фазообертача, M – число розрядів фазообертача.

За рахунок відмов ППК АФАР рівень бічних пелюсток погіршується. Залежність підвищення РБП від відносного зменшення кількості випромінюючих каналів добре апроксимується поліноміальною функцією:

$$q_{\Sigma}\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right) = q_{\Sigma 0}\left[1 + S_1 \frac{\Delta N}{N_0} - S_2 \left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)^2 + S_3 \left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)^3\right] \quad (3.5)$$

В залежності (3.5) значення коефіцієнтів S_1, S_2, S_3 визначаються методом імітаційного (статистичного) моделювання для кожного зразка АФАР.

Для круглої плоскої антенної решітки на 8000 випромінюючих каналів з круговим амплітудно-фазовим розподілом Тейлора на 40 dB і розташуванні випромінювачів у вузлах гексагональної сітки апертури АФАР, представленій американськими проф. Е. Л. Хольцманом і А. К. Агравалом у роботах [218, 219], залежність РБП від відносного зменшення кількості ППК можна уявити поліноміальною функцією (3.5), в якій значення коефіцієнтів S_1, S_2, S_3 для РБП мають таке значення: $S_1 = 43,7$, $S_2 = 233,6$, $S_3 = 985,2$.

Для оцінки надійності плоской АФАР на 6400 передавальних каналів, досліджуваної в дисертаційній роботі в залежності від погіршення РБП при зменшенні кількості працездатних випромінюючих ППК значення застосовується та ж поліноміальна залежність (3.5).

На рис. 3.2 представлені графіки погіршення РБП від відносного значення кількості відмовивших випромінюючих ППК для АФАР на 8000 випромінюючих елементів (АФАР проф.Е. Л. Хольцмана і А. К. Агравала) і для АФАР на 6400 випромінюючих елементів, яка досліджується у цій роботі.

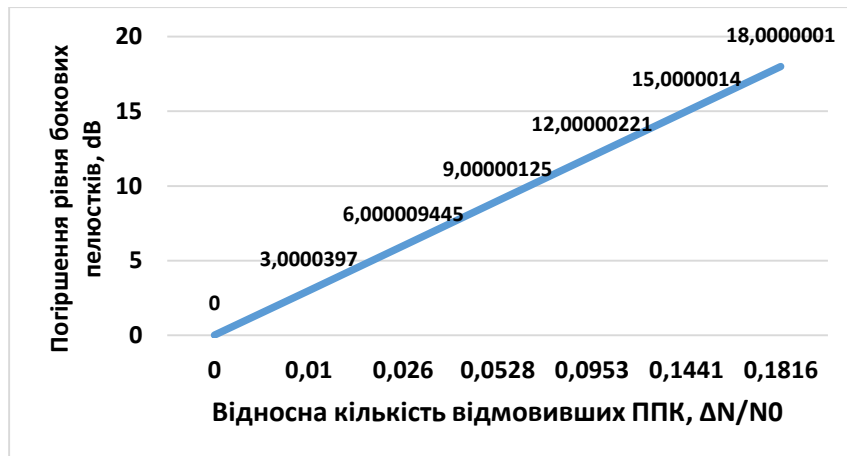


Рис. 3.1 Залежність погіршення логарифма с.к.з РБП ДС від відносної кількості відмовивших ППК.

З рис. 3.1 видно, що графіки залежності логарифма с.к.з РБП ДС зі збільшенням кількості відмовивших випромінюючих каналів лінійно зростають.

3.3.4 Формулювання критеріїв відмов активних фазованих антенних решіток

Відповідно до розглянутих вище характеристик радіолокатора і антенної решітки розроблені два основних і один додатковий критерії відмов АФАР [107]:

Перший основний критерій відмови АФАР – зниження максимальної дальності дії багатofункціональної РЛС нижче допустимого рівня.

Другий основний критерій відмови АФАР – допустиме погіршення рівня бічних пелюсток (РБП) АФАР, тобто підвищення значення РБП вище допустимого рівня.

Допустима відмова 13 з 64 антенних приймал.-перед. модулів

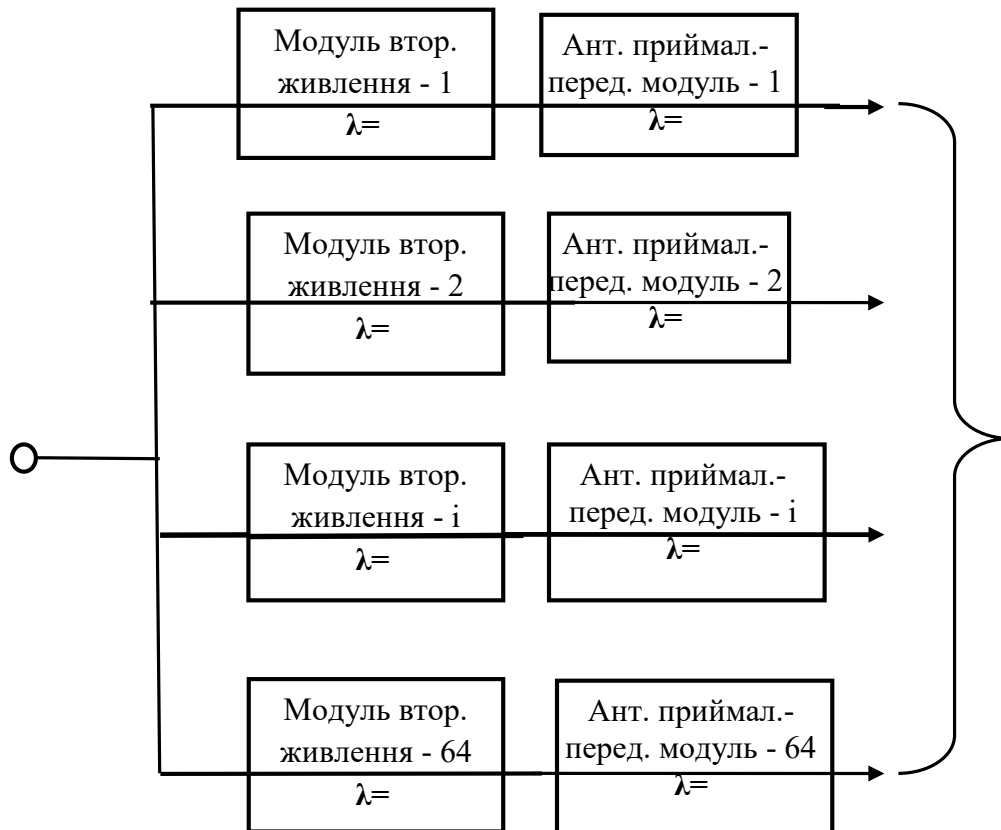


Рис.3.2 ССН активної фазованої антенної підрешітки

Додатковий критерій відмови антенної підрешітки і АФАР у цілому – зниження загальної кількості працездатних приймально-передавальних каналів антенної решітки нижче допустимого рівня.

3.4 Структурні схеми надійності активних фазованих антенних решіток

В сучасних активних фазованих антенних решітках загальна кількість надвисокочастотних модулів (каналів) становить від кількох тисяч до кількох десятків тисяч. Для забезпечення керованості активні фазовані антенні решітки фрагментують на ряд антенних фазованих підрешіток – S_0 , кожна з яких характеризується своїм значенням амплітуди і фази НВЧ сигналу для всіх приймально-передавальних модулів (каналів) даної підрешітки. Кожна

антенна підрешітка містить G_0 – приймально-передавальних модулів (каналів).

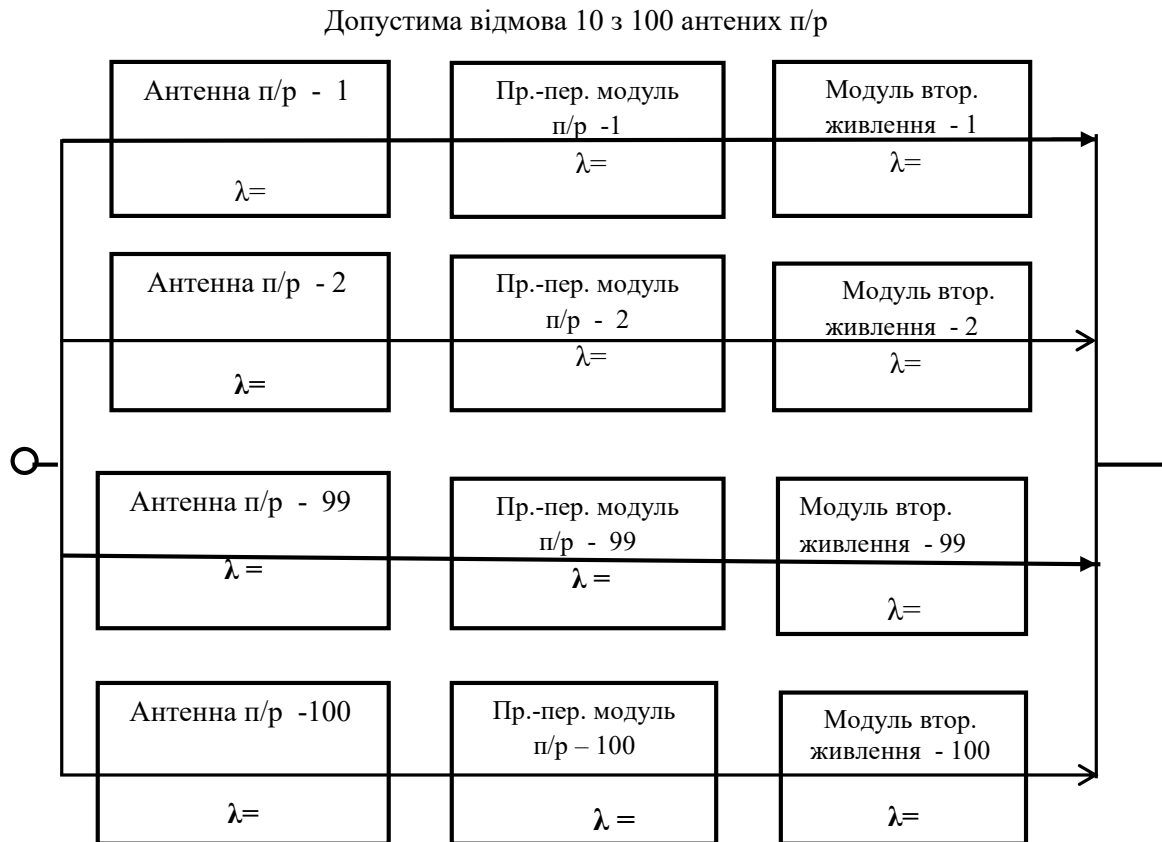


Рис. 3.3 Другий рівень ССН активної фазованої антенної решітки радіолокаційної станції

Відповідно, загальна кількість антенних приймально-передавальних модулів (каналів) в активній фазованій антенній решітці дорівнює $N_0 = G_0 S_0$. Характерною для активної фазованої антенної решітки буде k - рівнева структурна схема надійності.

3.5 Розроблення математичної моделі надійності приймально-передавальної активної фазованої антенної решітки, що не обслуговується, за критерієм допустимого зниження кількості приймально-передавальних каналів

3.5.1 Загальні положення

АФАР РЛС за своєю структурною побудовою можна ідентифікувати як ієрархічну систему з розгалуженою багаторівневою структурою, тому при розробці математичної моделі надійності АФАР можливе використання математичного апарату ізотропних ієрархічних систем [100, 161].

Кількість працездатних ППК - $N(t)$, підчас використання математичного апарату ізотропних ієрархічних систем [161] може бути визначено за формулою:

$$E = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{M^{(k)}}{k!} \left. \frac{d^k \Phi(z)}{dz^k} \right|_{z=0} \quad (3.6)$$

де $M^{(k)}$ – k -ий початковий момент розподілу числа працездатних випромінюючих каналів;

$$\left. \frac{d^k \Phi(z)}{dz^k} \right|_{z=0} - k\text{-а похідна } \Phi(z) \text{ за } z \text{ з подальшою підстановкою};$$

$z = 0$ за умови, що функція $\Phi(z)$ диференційована.

Початкові моменти $M^{(k)}$ можуть бути знайдені на основі наступного рекурентного відношення для моментної функції:

$$\varphi_n(z) = \varphi_{n-1}(r_n e^z + q_n)^{a_n}, \quad (3.7)$$

де n – кількість рівнів структурної схеми надійності АФАР;

a_i – коефіцієнт розгалуження i -го рівня, тобто кількість елементів i -го рівня, які підпорядковані одному елементу $(i-1)$ -го рівня;

r_i – значення імовірності безвідмовної роботи елемента i -го рівня;

q_i – значення імовірності відмови елемента i -го рівня.

Перші початкові моменти (математичне очікування і другий початковий момент числа працездатних ППК) мають вигляд [161]:

$$M_n^{(1)} = M_{n-1}^{(1)} a_n r_n = r_0 \prod_{i=1}^n a_i r_i, \quad (3.8)$$

$$M_n^{(2)} = M_{n-1}^{(2)} (a_n r_n)^2 + M_{n-1}^{(1)} r_n q_n a_n \quad (3.9)$$

Отже, середня кількість працездатних випромінюючих каналів в k – рівневої структурної схеми надійності АФАР можна визначити за формулою (3.8). 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.

3.5.2 Побудова математичної моделі надійності активної фазованої антенної решітки, що не обслуговується, з k – рівневою структурною схемою надійності

АФАР утворена N_0 випромінюючими приймально-передавальними каналами. При функціонуванні АФАР допустимо не більше $\frac{\Delta N}{N_0}$ відмов ППК.

Структурна схема АФАР описується k - рівневою ССН .

Кількість відмовивших ППК у k - рівневій АФАР визначається за формулою:

$$\Delta N = N_0 \{1 - P_{\text{ППМ1}}(t) P_{\text{ППМ2}}(t) \dots P_{\text{ППМk}}(t) [P_{\text{МВЖ}}(t)]^k\} \quad (3.10)$$

Використовуючи формулу (3.10) можна вивести рівняння для визначення середнього наробітку до відмови АФАР - $T_{0_АФАР}$ [73, 85]:

$$(\Delta N)_{\text{доп.}} + 1 = N_0 \{ 1 - P_{\text{ППМ1}}(T_{0_АФАР}) P_{\text{ППМ2}}(T_{0_АФАР}) \dots P_{\text{ППМk}}(T_{0_АФАР}) [P_{\text{МВЖ}}(T_{0_АФАР})]^k \} \quad (3.11)$$

Для експоненціального розподілу відмов каналів та АФАР рівняння (3.32) трансформується у формулу для визначення відносного наробітку до відмови передавальної АФАР:

$$\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ППМ1}} = - \frac{\ln(1 - \frac{\Delta N}{N_0} \frac{1}{N_0})}{1 + \frac{T_{0_ППМ1}}{T_{0_ППМ2}} + \dots + \frac{T_{0_ППМ1}}{T_{0_ППМk}} + \frac{kT_{0_ППМ1}}{T_{0_МВЖ}}} \quad (3.12)$$

Для визначення імовірності безвідмовної роботи антенної підрешітки використовується математична модель розрахунку надійності системи зі ковзаючим гарячим резервуванням [161]

$$P_{\text{ПДР}}(t) = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [P_{\text{ППК}}(t) P_{\text{МВЖ}}(t)]^{G_0-i} [1 - P_{\text{ППК}}(t) P_{\text{МВЖ}}(t)]^i \quad (3.13)$$

Для визначення імовірності безвідмовної роботи АФАР з дворівневою ССН використовується наступна формула:

$$P_{\text{АФАР}}(t) = \sum_{j=0}^{m_S} C_{S_0}^j [P_{\text{ПДР}}(t) P_{\text{МВЖ}}(t) P_{\text{ППМП}}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{\text{ПДР}}(t) P_{\text{МВЖ}}(t) P_{\text{ППМП}}(t)]^j \quad (3.14)$$

де:

$P_{\text{ПДР}}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи антенної підрешітки визначається за формулою (3.13);

$Q_{\text{ПДР}}(t) = 1 - P_{\text{ПДР}}(t)$ – імовірність умовної відмови антенної підрешітки;
 m_S – допустима кількість умовних відмов підрешіток в АФАР;

S_0 – загальна кількість підрешіток в АФАР.

Гамма-відсотковий ресурс АФАР - $T_{\gamma_{\text{АФАР}}}$ визначається вирішенням рівняння:

$$P_{\text{АФАР}}(t = T_{\gamma_{\text{АФАР}}}) - \gamma_{\text{АФАР}} = 1 \quad (3.15)$$

Приклад 3.1

Для АФАР з дворівневою ССН допустимо 10% відмов ППК, тобто $\Delta N/N = 0,10$. Відомі інтенсивності відмов каналів і модулів:

$$\lambda_{\text{ППК}} = 0,00001 \text{ год}^{-1}, \lambda_{\text{МВЖ}} = 0,000001 \text{ год}^{-1}, \lambda_{\text{ППМП}} = 0,000005 \text{ год}^{-1}.$$

Необхідно визначити відносний наробіток до відмови АФАР –

$T_{0_АФАР}/T_{0_ППК}$ і кількість умовно відмовивших підрешіток – m_S за допустимості відмов ППК – $m_G = 8$ у підрешітці.

Рішення:

a) Визначаємо допустиму кількість відмов ППК:

$$\Delta N = 10\% \times N / 100 = 0,1 \times 6400 = 640 \text{ ППК}.$$

b) Відмовою АФАР вважається відмова $\Delta N + 1 = 640 + 1 = 641$ ППК.

c) Використовуючи рівняння (3.11) визначаємо відносний наробіток до відмови АФАР - $T_{0_АФАР_1} / T_{0_ППК} = 0,06198$.

d) Використовуючи рівняння (3.53) визначаємо допустиму кількість умовних відмов антенних підрешіток за допустимою кількістю відмов у кожній підрешітці – $m_G = 8$.

e) Оскільки допустима кількість відмов підрешіток - m_S може приймати тільки цілочисельні значення, то і значення $T_{0_АФАР} / T_{0_ППК}$ може трохи уточнитися (на кілька відсотків в більшу сторону). Знаходимо $m_S = 5$ і $T_{0_АФАР_2} / T_{0_ППК} = 0,06211$ і уточнені значення.

$$[\Delta N/N]_{\text{уточ.}} = 0,1002 \text{ і кількості відмов ППК – } (\Delta N)_{\text{уточ.}} = 642 \text{ ППК}.$$

f) Для $(\Delta N)_{\text{уточ.}} = 642$ ППК, $m_S = 5$ і $m_G = 8$ визначимо можливі розподіли відмов ППК в АФАР за антенними підрешітками:

а. Перший варіант можливого розподілу за підрешітками ППК, що відмовили:

$$(m_g + 1) \times (m_s + 1) + 8 \times W_0 + 7 \times W_1 + 6 \times W_2 + 5 \times W_3 + 4 \times W_4 + 1 \times W_5 = (\Delta N)_{\text{уточ}};$$

$$9 \times 6 + 8 \times 10 + 7 \times 30 + 6 \times 40 + 5 \times 5 + 4 \times 8 + 1 \times 1 = 642 \text{ ППК};$$

$$(m_s + 1) = 6, W_0 = 10, W_1 = 30, W_2 = 40, W_3 = 5, W_4 = 8, W_5 = 1.$$

$$\text{Перевірка: } (m_s + 1) + W_0 + W_1 + W_2 + W_3 = (5 + 1) + 10 + 30 + 40 + 5 + 8 + 1 = 100.$$

б. Другий варіант можливого розподілу за підрешітками ППК, що відмовили:

$$9 \times 6 + 8 \times 8 + 7 \times 30 + 6 \times 38 + 5 \times 14 + 4 \times 4 = 642 \text{ ППК}.$$

с. Третій варіант можливого розподілу за підрешітками ППК, що відмовили

$$9 \times 6 + 8 \times 10 + 7 \times 25 + 6 \times 38 + 5 \times 21 = 642 \text{ ППК}.$$

Для випадку прояву раптових відмов ППК і МВЖ в АФАР (експоненціальний розподіл відмов):

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

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

Отже, побудована модель надійності АФАР за критерієм допустимого зниження кількості відмов ППК і отримані прості формули для розрахунку середнього наробітку до відмови за експоненціальним розподілом відмов (прояв раптових відмов) ППК і МВЖ.

Приклад 3.2 Розрахунок показників надійності передавальної АФАР

Структурна схема надійності передавальної дворівневої АФАР РЛС включає:

$N_0 = 6400$ передавальних (випромінюючих) каналів;

$S_0 = 100$ передавальних (випромінюючих) антенних підрешіток;

$G_0 = 64$ передавальних (випромінюючих) каналів в передавальній антенній підрешітці;

$m_G = 13$ допустима кількість відмов випромінюючих каналів в передавальній антенній підрешітці;

m_S - допустима кількість відмов передавальних антенних підрешіток в передавальній АФАР.

Відмови передавальних каналів і модулів розподіляються за експоненціальним законом (раптові відмови).

Інтенсивності відмов передавальних (випромінюючих) каналів антенних модулів $\lambda_{\text{АПЕРК}}$ змінюються в діапазоні від $0,000004 \text{ год.}^{-1}$ до $0,000013 \text{ год.}^{-1}$.

Інтенсивність відмов. передавальних (випромінюючих) каналів модулів антенної підрешітки $\lambda_{\text{ППЕРК}} = 0,000001 \text{ год.}^{-1}$.

Інтенсивності відмов модулів вторинного живлення $\lambda_{\text{МВЖ}}$ змінюються в діапазоні від $0,000005 \text{ год.}^{-1}$ до $0,000020 \text{ год.}^{-1}$.

Допустима кількість відмов передавальних антенних підрешіток в передавальній АФАР m_S , змінюється від 1 до 10.

На рис. 3.4 представлені графіки залежностей середнього наробітку до відмови передавальної АФАР від допустимого зниження максимальної дальності радіолокатора $\Delta D/D$ для однорівневої АФАР (при розрахунку за критерієм допустимого зниження максимальної дальності локатора (червона лінія)) і для дворівневої АФАР (за критерієм допустимого зниження кількості випромінюючих каналів в антенній решітці (синя лінія)).

На рис. 3.4 допустима кількість відмов передавальних антенних підрешіток дворівневої АФАР залежить від допустимого зниження максимальної дальності локатора $\Delta D/D$ і змінюється за наступною схемою: для $\Delta D/D = 0,025$ – $m_S = 1,2$; для $\Delta D/D = 0,050$ – $m_S = 3,4$; для $\Delta D/D = 0,075$ – $m_S = 5,6$; для $\Delta D / D = 0,100$ – $m_S = 7,8$.

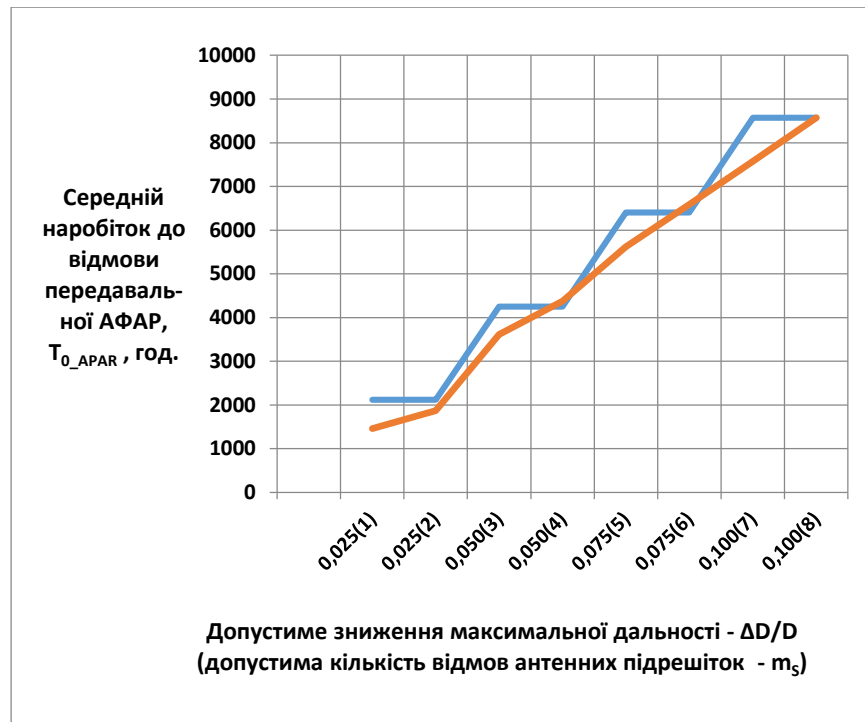


Рис. 3.4 Графіки залежності середнього наробітку до відмови передавальної АФАР для двох критеріїв відмов: при допустимому зниженні максимальної дальності локатора і допустимій кількості відмов антенних підрешіток: для моделі надійності за критерієм допустимого зниження максимальної дальності локатора - синя лінія, для дворівневої моделі надійності передавальної АФАР - червона лінія.



Рис. 3.5 Графік залежності відносної похибки визначення середнього наробітку до відмови передавальної АФАР від допустимої кількості відмов антенних підрешіток

Як видно з рис. 3.5 відносна похибка визначення значення середнього наробітку до відмови передавальної АФАР для дворівневої АФАР (в порівнянні з дворівневою АФАР) становить від 0 до 15%, що цілком задовольняє умову проведення розрахунків надійності АФАР в межах інженерної точності. На рис. 3.6 представлені графіки залежності середнього наробітку до відмови передавальної АФАР модель одnorівневої АФАР) від інтенсивностей відмов передавальних каналів антенних модулів при різних значеннях інтенсивностей відмов модулів електроживлення. На рис. 3.7 представлені графіки залежності середнього наробітку до відмови передавальної АФАР (модель дворівневої АФАР) від інтенсивностей відмов передавальних каналів антенних модулів для допустимого зниження максимальної дальності радіолокатора $\Delta D/D = 0,100$ при різних значеннях допустимих відмов передавальних антенних підрешіток.

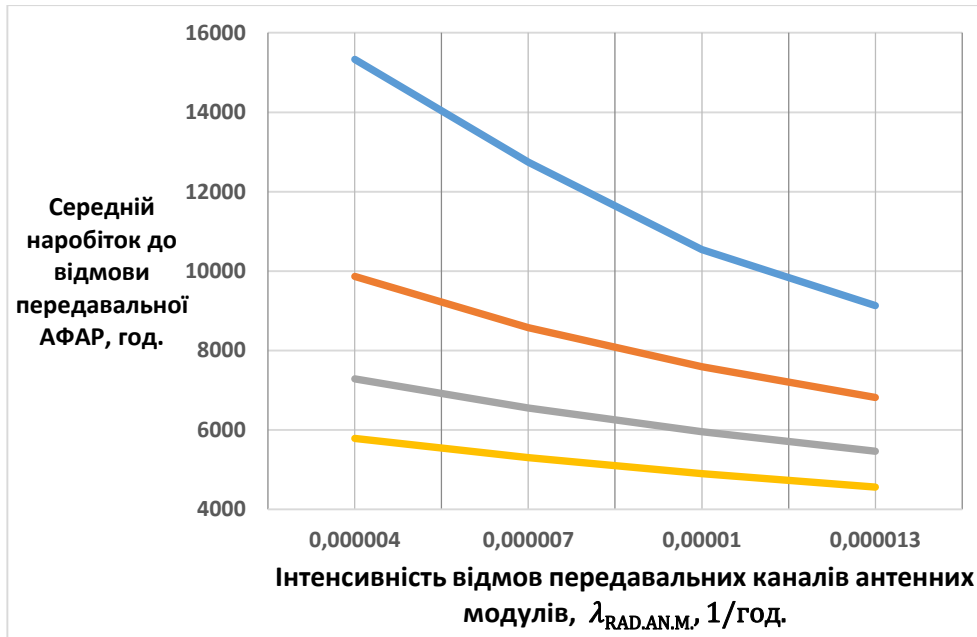


Рис.3.6 Графіки залежності середнього наробітку до відмови передавальної однорівневої АФАР і передавальної частини приймально-передавальної АФАР для $\Delta D/D = 0,100$ від інтенсивностей відмов передавальних каналів антенних модулів при різних інтенсивностях відмов модулів вторинного живлення λ_{MBJ} : при $\lambda_{MBJ} = 0,000005$ год⁻¹. - лінія синього кольору; при $\lambda_{MBJ} = 0,000010$ год⁻¹. - лінія червоного кольору; при $\lambda_{MBJ} = 0,000015$ год⁻¹ - лінія зеленого кольору; при $\lambda_{MBJ} = 0,000020$ год⁻¹. - лінія фіолетового кольору

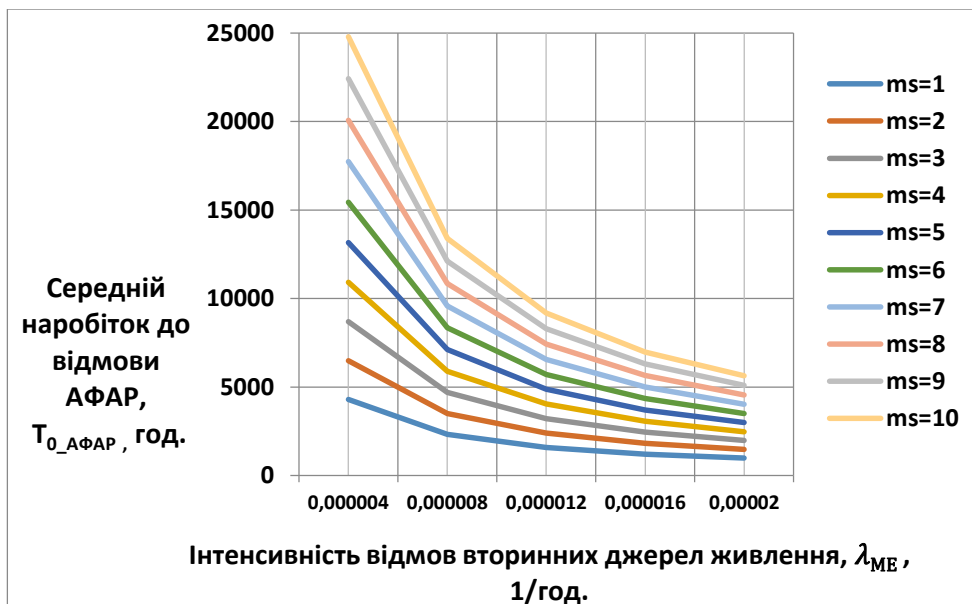


Рис.3.7 Графіки залежності середнього наробітку до відмови передавальної АФАР T_{0_AFAR} від інтенсивностей відмов модулів вторинного живлення λ_{MBJ} для $\Delta D/D = 0,100$ при різних значеннях припустимої кількості відмов антенних підрешіток m_s .

3.6 Розроблення математичної моделі надійності активної фазованої антенної решітки, що не обслуговується, за критерієм допустимого рівня зниження максимальної дальності радіолокаційної станції

3.6.1 Класичне рівняння дальності радіолокації

Класичне рівняння дальності радіолокації (рівняння радіолокації) - формула (3.1) у простій і наочній формі пов'язують між собою максимальну дальність дії радіолокатора, його параметрами, а також параметри цілі:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{пер.}} \cdot G_{\text{пер.}} \cdot G_{\text{пр.}} \cdot \sigma_{\text{эф.}} \cdot \lambda^2}{(\pi)^3 P_{\text{пр. min.}}}}, \quad (3.16)$$

де: $P_{\text{пер.}} = P_{\text{випр.}}$ – потужність, що випромінюється АФАР (випромінювана потужність);

$P_{\text{пр. min}}$ – найменша приймальна потужність (чутливість приймача);

$\sigma_{\text{эф.}}$ – ефективна поверхня розсіювання (приймається рівною 1 м^2);

λ – довжина хвилі;

$G_{\text{пер.}}$ – коефіцієнт посилення передавальної антени;

$G_{\text{пр.}}$ – коефіцієнт посилення приймальної антени.

Рівняння радіолокації (3.16) може використовуватися для оцінки тактико-технічних характеристик радіолокатора [144]. Так як умова зниження максимальної дальності дії на допустиму величину є основним критерієм відмови РЛС з АФАР, то можна вивести аналітичний вираз (формулу) для визначення показника надійності (середнього наробітку до відмови) АФАР. Характеристики ефективності АФАР: $\sigma_{\text{эф.}}$, λ , $P_{\text{пр. min}}$ є незмінними в процесі роботи, не залежать від часу наробітку РЛС і не залежать від кількості каналів

і модулів АФАР, що відмовили. Тому у формулі радіолокації вони є постійною величиною. За цим, рівняння радіолокації (3.16) може бути представлене у такому вигляді:

$$D = P_{\text{випр.}} K_{\text{пер.}} K_{\text{пр.}} \sqrt[4]{a} \quad (3.17).$$

Рівняння радіолокації після зведення лівої і правої частин в четверту ступінь набуває такого вигляду:

$$D^4 = a P_{\text{випр.}} K_{\text{пер.}} K_{\text{пр.}} \quad (3.18)$$

3.6.2 Виведення формули для середнього наробітку до відмови активної фазованої антенної решітки

Дворівнева структурна схема надійності приймально-передавальної АФАР багатофункціональної РЛС включає: N_0 – загальну кількість приймально-передавальних каналів; S_0 - кількість приймально-передавальних антенних підрешіток; G_0 - кількість приймально-передавальних каналів антенної підрешітки; m_G - допустиму кількість відмов приймально-передавальних каналів антенної підрешітки; m_S - допустиму кількість «відмов» приймально-передавальних антенних підрешіток в АФАР.

Під час зниження максимальної дальності РЛС на $\frac{\Delta D}{D}$ рівняння радіолокації матиме вигляд [83, 144]:

$$D^4 \left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 = a P_{\text{випр.}} \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{випр.}}}{P_{\text{випр.}}}\right) K_{\text{пер.}} \left(1 - \frac{\Delta K_{\text{пер.}}}{K_{\text{пер.}}}\right) K_{\text{пр.}} \left(1 - \frac{\Delta K_{\text{пр.}}}{K_{\text{пр.}}}\right) \quad (3.19)$$

Після скорочення лівої і правої частин рівняння на D^4 рівняння радіолокації (3.19) набуває такого вигляду:

$$\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 = \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{випр.}}}{P_{\text{випр.}}}\right) \left(1 - \frac{\Delta K_{\text{пер.}}}{K_{\text{пер.}}}\right) \left(1 - \frac{\Delta K_{\text{пр.}}}{K_{\text{пр.}}}\right) \quad (3.20)$$

Зниження випромінюваної потужності $\frac{\Delta P_{\text{випр.}}}{P_{\text{випр.}}}$ та зменшення коефіцієнтів посилення передавальної антени $\frac{\Delta K_{\text{пер.}}}{K_{\text{пер.}}}$ і приймальної антени $\frac{\Delta K_{\text{пр.}}}{K_{\text{пр.}}}$ визначається відмовами передавального $\Delta n_{\text{пер.АМ}}$ та приймального $\Delta n_{\text{пр.АМ}}$ каналів антенних приймально-передавальних модулів, передавального $\Delta n_{\text{пер.МП}}$ і приймального $\Delta n_{\text{пр.МП}}$ каналів приймально-передавальних модулів підрешітки і відмовами модулів вторинного електроживлення $\Delta n_{\text{пр.МЕ}}$:

$$\frac{\Delta P_{\text{випр.}}}{P_{\text{випр.}}} = \frac{\Delta n_{\text{пер.АМ}}}{n_{\text{пер.АМ}}} + \frac{\Delta n_{\text{пр.МЕ}}}{n_{\text{пр.МЕ}}} + \frac{\Delta n_{\text{пер.МП}}}{n_{\text{пер.МП}}} \quad (3.21)$$

$$\frac{\Delta K_{\text{пер.}}}{K_{\text{пер.}}} = \frac{\Delta n_{\text{пер.АМ}}}{n_{\text{пер.АМ}}} + \frac{\Delta n_{\text{пр.МЕ}}}{n_{\text{пр.МЕ}}} + \frac{\Delta n_{\text{пер.МП}}}{n_{\text{пер.МП}}} \quad (3.22)$$

$$\frac{\Delta K_{\text{пр.}}}{K_{\text{пр.}}} = \frac{\Delta n_{\text{пр.АМ}}}{n_{\text{пр.АМ}}} + \frac{\Delta n_{\text{пр.МЕ}}}{n_{\text{пр.МЕ}}} + \frac{\Delta n_{\text{пр.МП}}}{n_{\text{пр.МП}}} \quad (3.23)$$

Відносна кількість відмов передавальних і приймальних каналів і модулів електроживлення АФАР характеризується імовірностями безвідмовної роботи:

$$\frac{\Delta n_{\text{пер.АМ}}}{n_{\text{пер.АМ}}} = 1 - P_{\text{пер.АМ.}}(T_{0\text{АФАР}}) \quad (3.24)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пер.МП}}}{n_{\text{пер.МП}}} = 1 - P_{\text{пер.МП.}}(T_{0\text{АФАР}}) \quad (3.25)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.МЕ}}}{n_{\text{пр.МЕ}}} = 1 - P_{\text{МЕ}}(T_{0\text{АФАР}}) \quad (3.26)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.АМ}}}{n_{\text{пр.АМ}}} = 1 - P_{\text{пр.АМ.}}(T_{0\text{АФАР}}) \quad (3.27)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.МП}}}{n_{\text{пр.МП}}} = 1 - P_{\text{пр.МП.}}(T_{0\text{АФАР}}) \quad (3.28)$$

Для довільних законів розподілу відмов каналів і модулів маємо такі співвідношення для визначення середнього наробітку до відмови АФАР:

$$\frac{\Delta P_{\text{випр.}}}{P_{\text{випр.}}} = 3 - P_{\text{пер.АМ}}(T_{0\text{АФАР}}) - P_{\text{пер.МП}}(T_{0\text{АФАР}}) - P_{\text{МЕ}}(T_{0\text{АФАР}}), \quad (3.29)$$

$$\frac{\Delta K_{\text{пер.}}}{K_{\text{пер.}}} = 3 - P_{\text{пер.АМ}}(T_{0\text{АФАР}}) - P_{\text{пер.МП}}(T_{0\text{АФАР}}) - P_{\text{МЕ}}(T_{0\text{АФАР}}), \quad (3.30)$$

$$\frac{\Delta K_{\text{пр.}}}{K_{\text{пр.}}} = 3 - P_{\text{пр.АМ}}(T_{0\text{АФАР}}) - P_{\text{пр.МП}}(T_{0\text{АФАР}}) - P_{\text{МЕ}}(T_{0\text{АФАР}}). \quad (3.31)$$

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

$$[P_{\text{пр.АМ}}(T_{0\text{АФАР}}) + P_{\text{пр.МП}}(T_{0\text{АФАР}}) + P_{\text{МЕ}}(T_{0\text{АФАР}}) - 2] \quad (3.32)$$

Якщо відмови каналів і модулів є раптовими, то для їх опису використовується експоненціальний розподіл. За цим, формули (3.24 - 3.28) приймають такий вигляд:

$$\frac{\Delta n_{\text{пер.АМ}}}{n_{\text{пер.АМ}}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{пер.АМ}} T_{0\text{АФАР}}) \quad (3.33)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пер.МП}}}{n_{\text{пер.МП}}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{пер.МП}} T_{0\text{АФАР}}) \quad (3.34)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.МЕ}}}{n_{\text{пр.МЕ}}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{пр.МЕ}} T_{0\text{АФАР}}) \quad (3.35)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.АМ}}}{n_{\text{пр.АМ}}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{пр.АМ}} T_{0\text{АФАР}}) \quad (3.36)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.МП}}}{n_{\text{пр.МП}}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{пр.МП}} T_{0\text{АФАР}}) \quad (3.37)$$

Виходячи з цього, рівняння радіолокатора матиме вигляд:

$$\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 = [\exp(-\lambda_{\text{пер.АМ}} \times T_{0\text{АФАР}}) + \exp(-\lambda_{\text{пер.МП}} \times T_{0\text{АФАР}}) + \exp(-\lambda_{\text{МЕ}} T_{0\text{АФАР}}) - 2]^2 \\ [\exp(-\lambda_{\text{пр.АМ}} \times T_{0\text{АФАР}}) + \exp(-\lambda_{\text{пр.МП}} \times T_{0\text{АФАР}}) + \exp(-\lambda_{\text{МЕ}} T_{0\text{АФАР}}) - 2] \quad (3.38)$$

Рівняння (3.38) містить неявну залежність середнього наробітку до відмови АФАР - $T_{0\text{АФАР}}$ від допустимого зниження максимальної дальності РЛС - $\frac{\Delta D}{D}$.
Вирішуючи наближено трансцендентне рівняння (3.38) щодо середнього наробітку до відмови можна визначити розрахункове значення $T_{0\text{АФАР}}$ з будь-якою заданою точністю.

Однак інженерам і дослідникам для проведення аналізу надійності АФАР більший інтерес представляє аналітична залежність $T_{0_АФАР}$ від $\frac{\Delta D}{D}$ у явному вигляді. Така залежність може бути визначена тільки як наближена під час використання розкладання експоненти в ряд Тейлора:

$$\exp(-\lambda_{\text{пер.АМ}}T_{0_АФАР}) \approx 1 - \lambda_{\text{пер.АМ}}T_{0_АФАР} + 0,50(\lambda_{\text{пер.АМ}}T_{0_АФАР})^2 - \dots \quad (3.39)$$

і використання в подальшому перших двох членів ряду, тоді формули (3.33) - (3.37) спрощуються:

$$\frac{\Delta n_{\text{пер.АМ}}}{n_{\text{пер.АМ}}} = \lambda_{\text{пер.АМ}}T_{0_АФАР} \quad (3.40)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пер.МП}}}{n_{\text{пер.МП}}} = \lambda_{\text{пер.МП}}T_{0_АФАР} \quad (3.41)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.МЕ}}}{n_{\text{пр.МЕ}}} = \lambda_{\text{пр.МЕ}}T_{0_АФАР} \quad (3.42)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.АМ}}}{n_{\text{пр.АМ}}} = \lambda_{\text{пр.АМ}}T_{0_АФАР} \quad (3.43)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.МП}}}{n_{\text{пр.МП}}} = \lambda_{\text{пр.МП}}T_{0_АФАР} \quad (3.44)$$

Підставляючи аналітичні вирази з формул (3.40) - (3.44) в формули (3.21) - (3.23) отримаємо такі наближені формули, що описують зниження випромінюваної потужності $\frac{\Delta P_{\text{випр.}}}{P_{\text{випр.}}}$ і зменшення коефіцієнтів посилення на передачу $\frac{\Delta K_{\text{пер.}}}{K_{\text{пер.}}}$ і на прийом $\frac{\Delta K_{\text{пр.}}}{K_{\text{пр.}}}$:

$$\frac{\Delta P_{\text{випр.}}}{P_{\text{випр.}}} \approx (\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}})T_{0_АФАР} \quad (3.45)$$

$$\frac{\Delta K_{\text{пер.}}}{K_{\text{пер.}}} \approx (\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}})T_{0_АФАР} \quad (3.46)$$

$$\frac{\Delta K_{\text{пр.}}}{K_{\text{пр.}}} \approx (\lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}})T_{0_АФАР} \quad (3.47)$$

Підставляємо вирази (3.45) - (3.47) в рівняння радіолокації (3.20), після чого воно стає наближеним та має такий вигляд:

$$\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 \approx [1 - (\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}})T_{0_АФАР}]^2 [1 - (\lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}})T_{0_АФАР}] \quad (3.48)$$

Під час використання перших двох членів розкладання експоненти в ряд рівняння (3.48) можна записати в такий спосіб:

$$\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 \approx \exp[-2(\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}})T_{0_АФАР}] \exp[-(\lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}})T_{0_АФАР}] \quad (3.49)$$

Прологарифмувавши рівняння (3.49) отримаємо для нього більш простий вираз щодо $T_{0_АФАР}$:

$$-4 \ln \left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right) = [2(\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) + (\lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}})]T_{0_АФАР} \quad (3.50)$$

З наближеного рівняння (3.64) можна вивести наближену формулу для визначення середнього наробітку до відмови АФАР $T_{0_АФАР}$ - у вигляді:

$$T_{0_АФАР} \approx \frac{4 \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)}}{2(\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) + \lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}} \quad (3.51)$$

і наближену формулу для визначення інтенсивності відмов АФАР:

$$\lambda_{0_АФАР} \approx \frac{2(\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) + \lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}}{4 \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)}} \quad (3.52)$$

Наближена формула (3.52) після перетворення має такий вигляд:

$$\lambda_{0_{\text{АФАР}}} \approx \frac{2\lambda_{\text{пер.АМ}} + 2\lambda_{\text{пер.МП}} + 3\lambda_{\text{МЕ}} + \lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}}}{4 \ln \frac{1}{(1 - \frac{\Delta D}{D})}} \quad (3.53)$$

З формули (3.53) випливає формула для відношення середнього наробітку до відмови передавальної АФАР до середнього наробітку до відмови передавального каналу антенного приймально-передавального модуля:

$$\frac{T_{0_{\text{АФАР}}}}{T_{0_{\text{пер.АМ}}}} = \frac{4 \ln \frac{1}{(1 - \frac{\Delta D}{D})}}{\left(2 + 2 \frac{T_{0_{\text{пер.АМ}}}}{T_{0_{\text{пер.МП}}}} + 3 \frac{T_{0_{\text{пер.АМ}}}}{T_{0_{\text{МЕ}}}} + \frac{T_{0_{\text{пер.АМ}}}}{T_{0_{\text{пр.АМ}}}} + \frac{T_{0_{\text{пер.АМ}}}}{T_{0_{\text{пр.МП}}}} \right)} \quad (3.54)$$

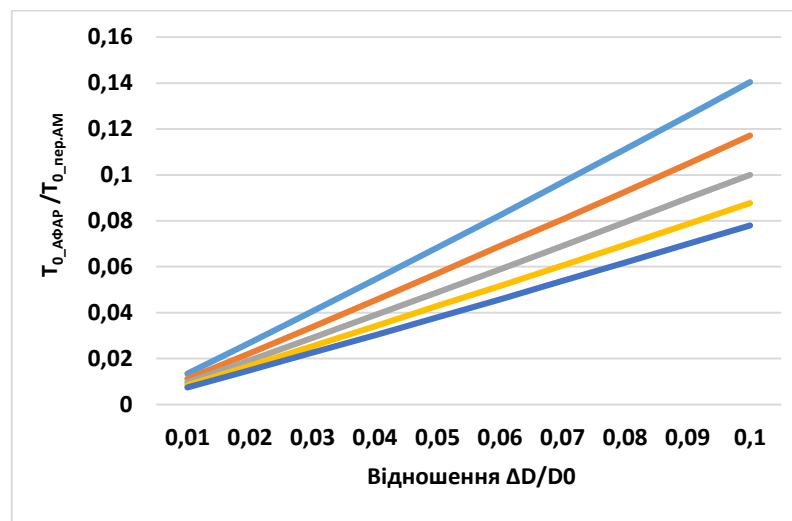


Рис. 3.8 Графіки залежності відношення середнього наробітку до відмови АФАР до середнього наробітку до відмови передавального каналу $\frac{T_{0_{\text{АФАР}}}}{T_{0_{\text{пер.АМ}}}}$ від погіршення відносної максимальної дальності РЛС - $\Delta D / D_0$ за різними значеннями відношення інтенсивності відмов модуля вторинного живлення до інтенсивності відмов модуля передавального каналу: $\frac{\lambda_{\text{МЕ}}}{\lambda_{\text{пер.АМ}}} = 0,2$ – лінія блакитного кольору; $\frac{\lambda_{\text{МВП}}}{\lambda_{\text{пер.АМ}}} = 0,4$ – лінія фіолетового кольору; $\frac{\lambda_{\text{МЕ}}}{\lambda_{\text{пер.АМ}}} = 0,6$ – лінія зеленого кольору; $\frac{\lambda_{\text{МЕ}}}{\lambda_{\text{пер.АМ}}} = 0,8$ – лінія червоного кольору; $\frac{\lambda_{\text{МЕ}}}{\lambda_{\text{пер.АМ}}} = 1,0$ – лінія синього кольору

Використання наближених значень середнього наробітку до відмови АФАР, обчислених за формулою (3.58) призводить до 1% - 5% похибок у порівнянні

з точними значеннями, визначеними під час вирішення трансцендентного рівняння (3.36) за значеннями зниження максимальної дальності радіолокатора: $\frac{\Delta D}{D} \leq 0,10$ і значеннях інтенсивностей відмов каналів і модулів АФАР: $\lambda_{\text{пер.АМ}}, \lambda_{\text{пер.МП}}, \lambda_{\text{МЕ}} \leq 10^{-5} \text{ год.}^{-1}$. Формула (3.58) дозволяє оцінити внесок інтенсивностей відмов кожного з чотирьох видів каналів і модуля вторинного електроживлення на інтенсивність відмов АФАР в цілому.

Приклад 3.3 Визначати показники надійності АФАР РЛС.

Вихідні дані: Кількість випромінюючих каналів :

$N = 6400$ кан, кількість підрешіток: $S = 100$ штук.

Допустиме зниження максимальної дальності радіолокатора:

$$\frac{\Delta D}{D} = 0,01 - 0,12.$$

Інтенсивності відмов: $\lambda_{\text{пер.АМ}} = (0,000001 - 0,000010) \text{ ч.}^{-1}$

$$\lambda_{\text{пер.МП}} = 0,000001 \text{ ч.}^{-1}, \quad \lambda_{\text{МЕ}} = (0,000001 - 0,000010) \text{ ч.}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{пр.АМ}} = 0,000001 \text{ ч.}^{-1}, \quad \lambda_{\text{пр.МП}} = 0,000001 \text{ ч.}^{-1}$$

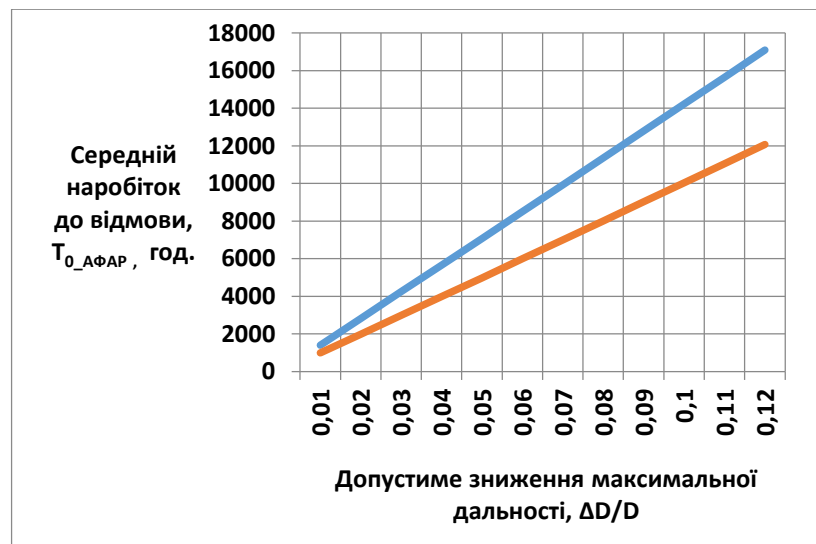


Рис. 3.9 Графіки залежності середнього наробітку до відмови від допустимого рівня зниження максимальної дальності РЛС с АФАР при наступних інтенсивностях відмов каналів і модулів: $\lambda_{\text{пр.МП}} = 0,000001 \text{ год.}^{-1}$, $\lambda_{\text{пер.АМ}} = 0,000007 \text{ год.}^{-1}$; $\lambda_{\text{пер.МП}} = 0,000001 \text{ год.}^{-1}$, $\lambda_{\text{пр.АМ}} = 0,000001 \text{ год.}^{-1}$, $\lambda_{\text{МЕ}} = 0,000004 \text{ год.}^{-1}$ - синя лінія; $\lambda_{\text{МЕ}} = 0,000008 \text{ год.}^{-1}$ - червона лінія.

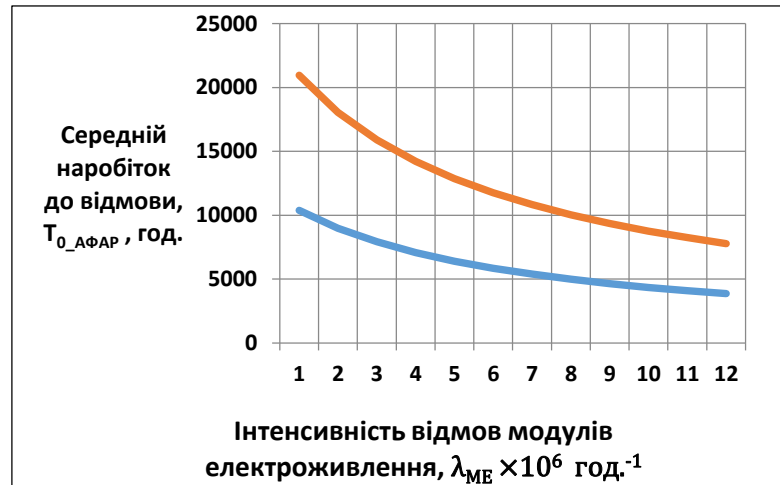


Рис. 3.10 Графіки залежності середнього наробітку до відмови АФАР РЛС від інтенсивності відмов модулів вторинного електроживлення $\lambda_{МЕ}$ для наступних інтенсивностей відмов каналів і модулів: $\lambda_{пр.МП} = 0,000001 \text{ год}^{-1}$, $\lambda_{пер.АМ} = 0,000007 \text{ год}^{-1}$; $\lambda_{пер.МП} = 0,000001 \text{ год}^{-1}$, $\lambda_{пр.АМ} = 0,000001 \text{ год}^{-1}$ при допустимому зниженні максимальної дальності: $\frac{\Delta D}{D} = 0,10$ – червона лінія, $\frac{\Delta D}{D} = 0,05$ – синя лінія

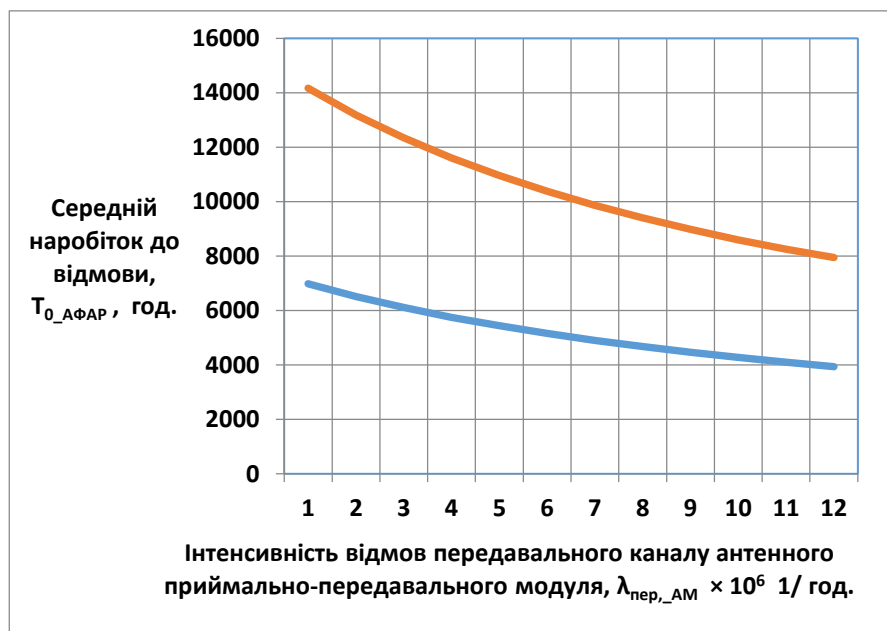


Рис. 3.11 Графіки залежності середнього наробітку до відмови АФАР РЛС від інтенсивності відмов передавальних каналів антенних приймально-передавальних модулів для наступних інтенсивностей відмов каналів і модулів: $\lambda_{пр.МП} = 0,000001 \text{ год}^{-1}$, $\lambda_{пер.АМ} = 0,000007 \text{ год}^{-1}$; $\lambda_{пер.МП} = 0,000001 \text{ год}^{-1}$, $\lambda_{пр.АМ} = 0,000001 \text{ год}^{-1}$ при допустимому зниженні максимальної дальності радіолокатора: $\frac{\Delta D}{D} = 0,10$ – червона лінія, $\frac{\Delta D}{D} = 0,05$ – синя лінія.

3.6.3 Виведення формули для визначення імовірності безвідмовної роботи активної фазованої антенної решітки

Математична модель надійності АФАР, представлена у розділі 3.6.2, не дозволяє визначати ІБР. Для побудови аналітичних виразів для визначення ІБР використовуємо дворівневу структурну схему надійності АФАР та метод, аналогічний представленому в розділі 3.5.3. [83].

Алгоритм розрахунку ІБР АФАР за критерієм допустимого зниження максимальної дальності радіолокатора включає три послідовні кроки:

Перший крок:

Визначення значення середнього наробітку до відмови $T_{0_АФАР_1}$ передавальної АФАР за критерієм допустимого зниження максимальної дальності радіолокатора з вирішення трансцендентного рівняння (3.48):

Другий крок:

Визначення значення допустимої кількості умовних відмов антенних підрешіток - m_S (яке забезпечує значення середнього наробітку до відмови $T_{0_АФАР_1}$, визначене на першому кроці) і значення середнього наробітку до відмови частини $T_{0_АФАР_2}$, використовуючи дворівневу структурну схему надійності АФАР, з вирішення рівняння:

$$[P_{МВЖ}(t_{отк.} = T_{0_АФАР_2})]^2 P_{ППМП}(t_{отк.} = T_{0_АФАР_2}) P_{ПДР}(t_{отк.} = T_{0_АФАР_2}) = 1 - \frac{m_S}{S_0} - \frac{1}{S_0} \quad (3.55)$$

При цьому допустиме число відмов ППК у підрешітці – m_G і допустима кількість відмов підрешіток в АФАР – m_S визначаються з рішення

трансцендентного рівняння (3.55) для часу наробітку – $t > T_{0_АФАР_1}$. Вибір значень m_G , проводиться починаючи з $m_G > \frac{2\Delta D}{D_0} G_0$ тощо.

Третій крок:

Використовуючи значення середнього наробітку до відмови – $T_{0_АФАР_2}$ і значення допустимої кількості відмов приймально-передавальних антенних підрешіток – m_S дворівневої АФАР, визначаються ІБР за формулою:

$$P_{АФАР}(t) = \sum_{j=0}^{m_S} C_{S_0}^j [P_{ПДР}(t)P_{МВЖ}(t)P_{ППМЖ}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{ПДР}(t)P_{МВЖ}(t)P_{ППМЖ}(t)]^j \quad (3.56)$$

де ІБР антенної підрешітки визначається за формулою (3.13):

$$P_{ПДР}(t) = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [P_{ППК}(t)P_{МВЖ}(t)]^{G_0-i} [1 - P_{ППК}(t)P_{МВЖ}(t)]^i$$

Приклад 3.4

У табл. 3.1 представлені рішення трансцендентного рівняння (3.48) для різних значень допустимого рівня зниження максимальної дальності радіолокатора - $\Delta D/D_0$ від 0,005 до 0,100 за різними значеннями допустимого числа відмов ППК у антенній підрешітці - m_G і допустимої кількості відмов антенних підрешіток у АФАР - m_S .

Рішення трансцендентного рівняння (3.44)

$\Delta D/D_0$	$\Delta N/N_0$	$T_{0_A_I}/T_{0_ППК}$	Варіант перший			Варіант другий			Варіант третій		
			m_G	m_S	$T_{0_A_II}/T_{0_ППК}$	m_G	m_S	$T_{0_A_II}/T_{0_ППК}$	m_G	m_S	$T_{0_A_II}/T_{0_ППК}$
0,005	0,00994	0,0100	1	13	0,0103	2	2	0,0106	-	-	-
0,010	0,0199	0,0200	1	36	0,0203	2	13	0,0204	3	4	0,0219
0,015	0,0298	0,0301	2	29	0,0304	3	12	0,0308	4	4	0,0318
0,020	0,0396	0,0403	3	24	0,0406	4	11	0,0417	5	4	0,0425
0,025	0,0494	0,0505	4	21	0,0508	5	9	0,0513	6	3	0,0512
0,030	0,0591	0,0607	5	17	0,0613	6	8	0,0622	7	3	0,0628
0,040	0,0784	0,0814	6	13	0,0838	7	6	0,0839	8	2	0,0833
0,050	0,0975	0,1022	8	16	0,1029	9	8	0,1025	10	4	0,1047
0,060	0,1163	0,1233	9	20	0,1243	10	12	0,1258	11	6	0,1257
0,070	0,1350	0,1446	10	23	0,1449	11	14	0,1454	12	8	0,1467
0,080	0,1535	0,1661	12	18	0,1696	13	11	0,1707	14	6	0,1714
0,090	0,1718	0,1879	13	20	0,1904	14	13	0,1924	15	8	0,1948
0,100	0,1898	0,2099	14	22	0,2119	15	14	0,2122	16	9	0,2152

На рис. 3.12 представлені графіки ІБР АФАР за $\Delta D/D_0 = 0,05$, $\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ППК}} = 0,1022$, $\Delta N/N_0 = 0,0975$ для трьох варіантів розподілу відмов ППК в АФАР.

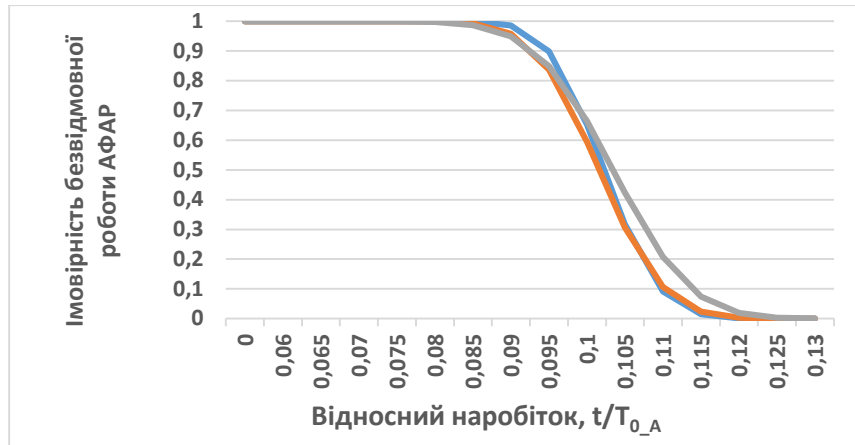


Рис. 3.12 Графіки залежності імовірності безвідмовної роботи для $\Delta D/D_0 = 0,05$, $\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ППК}} = 0,1022$, $\Delta N/N_0 = 0,0975$ для трьох варіантів розподілу відмов ППК:

- перший варіант - $m_G = 8$, $m_S = 16$, $T_{0_A_2} / T_{0_ППК} = 0,10285$ – синя лінія;
- другий варіант - $m_G = 9$, $m_S = 8$, $T_{0_A_2} / T_{0_ППК} = 0,10245$ – червона лінія;
- третій варіант - $m_G = 10$, $m_S = 4$, $T_{0_A_2} / T_{0_ППК} = 0,10475$ – зелена лінія

На рис. 3.13 представлені графіки залежності середнього наробітку до відмови АФАР до відмови ППК – $T_{0_АФАР}/T_{0_ППК}$ і відносної кількості відмов ППК – $\Delta N/N_0$ від відносного погіршення дальності $\Delta D/D_0$. З рис. 3.10 видно, що залежності $T_{0_АФАР}/T_{0_ППК}$ і $\Delta N/N_0$ лінійно зростають. На інтервалі $\Delta D/D_0$ від 0 до 0,025 графіки кривих практично співпадають, а на інтервалі $\Delta D/D_0$ від 0,025 до 0,100 поступово розходяться.

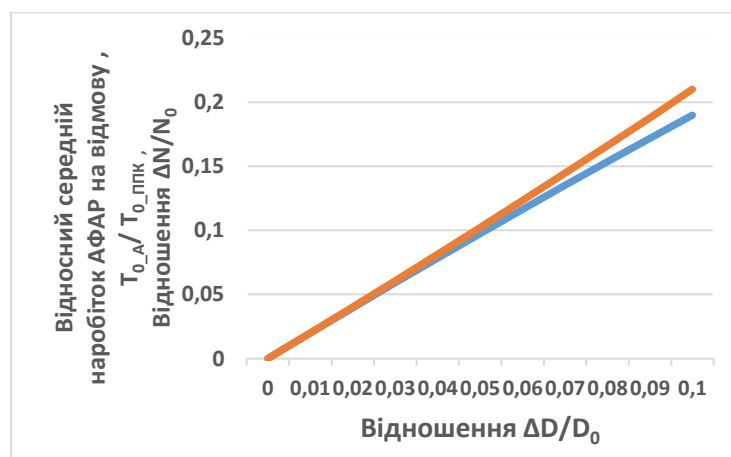


Рис.3.13 Графіки залежності відносного середнього наробітку до відмови АФАР – $T_{0_A}/T_{0_ППК}$ (червона лінія) і відносної кількості відмов ППК (синя лінія) – $\Delta N/N_0$ від відносного погіршення дальності $\Delta D/D_0$

**3.7 Розроблення математичної моделі надійності активної
фазованої антенної решітки, що не обслуговується,
в приймальному режимі за критерієм допустимого погіршення
рівня бічних пелюсток**

3.7.1 Загальні положення

Під час визначення показників надійності приймально-передавальної АФАР РЛС у приймальному режимі необхідно враховувати погіршення рівня бічних пелюсток [84, 85].

Дворівнева структурна схема надійності приймально-передавальної АФАР РЛС включає: N_0 – загальну кількість ППК; S_0 – кількість приймально-передавальних антенних підрешіток; G_0 – кількість ППК в антенній підрешітці; m_G – допустиму кількість відмов ППК в антенній підрешітці; m_S – допустима кількість умовних відмов приймально-передавальних антенних підрешіток в АФАР.

**3.7.2 Критерій відмови аналогової активної фазованої
антенної решітки у режимі прийому**

Критерієм відмови приймально-передавальної АФАР у режимі прийому є погіршення РБП, що виявляється 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

$$\log \left\{ q \left[\frac{\Delta N}{N_0} (t = 0) \right] \right\} - \log \left\{ q \left[\frac{\Delta N}{N_0} (T_{0_АФАР}) \right] \right\} \leq \left\{ \Delta \log \left[q \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) \right] \right\}_{\text{доп.}} \quad (3.57)$$

3.7.3 Побудова математичної моделі надійності аналогової активної фазованої антенної решітки у режимі прийому

Для аналогової АФАР, що досліджується, використовується поліноміальна залежність РБП від відносної кількості відмов $\frac{\Delta N}{N_0}$ формули (3.5) – (3.6), представлені у розділі 3.3.3:

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

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

Для плоскої аналогової АФАР на 6400 передавальних каналів, що досліджується у дисертаційній роботі, коефіцієнти в поліноміальній залежності для РБП мають таке значення: $S_1 = 43,37$, $S_2 = 221,6$, $S_3 = 995$

Відповідно, формула (3.6) набуває такого вигляду:

$$q\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right) = \frac{3,142 \left[1 + 43,37 \frac{\Delta N}{N_0} - 221,6 \left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)^2 + 995 \left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)^3 \right]}{8 \sqrt{3 \times 6400}} \quad (3.58)$$

Відносна кількість відмов ППК за довільним розподілом відмов каналів і модулів АФАР (з урахуванням структурних схем надійності) визначається за формулою:

$$\frac{\Delta N}{N_0}(t) = 1 - P_{PPK}(t) P_{ППМП}(t) [P_{МВЖ}(t)]^2 \quad (3.59)$$

Для експоненціального розподілу відмов каналів і модулів формула (3.59) для відносної кількості відмов ППК скорочується:

$$\frac{\Delta N(t)}{N_0} = 1 - \exp \left[-\frac{t}{T_{0_ППК}} \left(1 + \frac{T_{0_ППК}}{T_{0_ППМП}} + \frac{2T_{0_ППК}}{T_{0_МВЖ}} \right) \right]; \quad (3.60)$$

За допомогою формул (3.5), (3.6) і умови (3.60), формується трансцендентне рівняння:

$$\log \left\{ q \left[\frac{\Delta N}{N_0} (T_{0_АФАР_1} / T_{0_ППК}) \right] \right\} - \log \left\{ q \left[\frac{\Delta N}{N_0} (t = 0) \right] \right\} = \left\{ \Delta \log \left[q \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) \right] \right\}_{\text{доп.}} \quad (3.61)$$

де:

$\log \{ q [\Delta N(t = 0)] \} = -50,95$ дб. – початковий рівень РБП за $t = 0$ і відсутності відмов ППК у аналоговій АФАР (на 6400 ППК) за $t = 0$.

Вирішивши рівняння (3.61) визначається середній наробіток до відмови АФАР – $\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ППК}}$.

Приклад 3.5

Визначити залежність середнього наробітку до відмови і РБП від відносної кількості відмов ППК для аналоговій АФАР на 6400 ППК.

Вихідні дані для АФАР, що досліджується: $N_0 = 6400$ ППК,

$T_{0_ППК} = 50\,000$ год., $T_{0_ППМП} = 250\,000$ год., $T_{0_МВЖ} = 250\,000$ год.

За допомогою формули (3.99) отримаємо експоненціальну залежність для відносної кількості відмов ППК АФАР, що досліджується:

$$\frac{\Delta N(t)}{N_0} = 1 - \exp \left[-\frac{t}{5 \times 10^4} (1 + 0,2 + 0,4) \right] = 1 - \exp \left(-\frac{t}{3,125 \times 10^4} \right) \quad (3.62)$$

На рис. 3.14 представлені графіки залежності погіршення логарифма РБП - $\log\left\{q\left[\frac{\Delta N}{N_0}\left(T_{0_АФАР_1}/T_{0_ППК}\right)\right]\right\}$ і відносного середнього наробітку до відмови приймально-передавальної АФАР - $T_{0_АФАР_1}/T_{0_ППК}$ від відносної кількості відмов ППК - $\Delta N/N_0$.

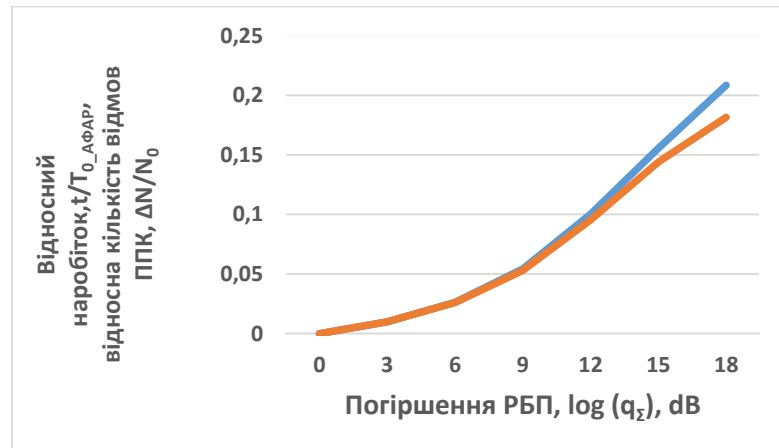


Рис. 3.14 Графік залежності погіршення РБП - $\log(q_\Sigma)$ і відносного середнього наробітку до відмови АФАР - $T_{0_АФАР_1}/T_{0_ППК}$ (синя лінія) від відносної кількості відмов ППК - $\Delta N/N_0$ (червона лінія)

Для визначення імовірнісних показників надійності в математичній моделі надійності приймально-передавальної АФАР з дворівневою схемою надійності вводяться такі поняття як: допустима кількість відмов ППК в підрешітці - m_G і допустима кількість умовних відмов підрешіток - m_S [107].

Примітка 1: Умовно відмовившою вважається підрешітка у якій відмовило $m_G + 1$ випромінювачів. В умовно відмовившій підрешітці є відмовившими тільки $m_G + 1$ ППК, інші ППК є працездатними і забезпечують функціонування АФАР

При визначенні ІБР АФАР з дворівневою ССН використовується класична формула для резервованої невідновлювальної структури зі змінним резервом [161]:

$$P_{АФАР}(t) = \sum_{j=0}^{m_S} C_{S_0}^j [P_{ПДР}(t)P_{МВЖ}(t)P_{ППМП}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{ПДР}(t)P_{МВЖ}(t)P_{ППМП}(t)]^j \quad (3.63)$$

де:

$P_{\text{ПДР}}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи антенної підрешітки;

$Q_{\text{ПДР}}(t) = 1 - P_{\text{ПДР}}(t)$ – імовірність умовної відмови антенної підрешітки;

$$P_{\text{ПДР}}(t) = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [P_{\text{ППК}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)]^{G_0-i} [1 - P_{\text{ППК}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)]^i \quad (3.64)$$

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;

m_S – допустима кількість умовних відмов підрешіток в АФАР;

S_0 – загальна кількість підрешіток в АФАР.

Щільність розподілу імовірності безвідмовної роботи антенної підрешітки визначається за формулою:

$$f_{\text{ПДР}}(t) = (G_0 - m_G) C_{G_0}^{m_G} [1 - P_{\text{ППК}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)]^{m_G} [P_{\text{ППК}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)]^{G_0 - m_G - 1} f(t) \quad (3.65)$$

Щільність розподілу імовірності безвідмовної роботи АФАР визначається за формулою:

$$f_{\text{АФАР}}(t) = - \frac{dP_{\text{АФАР}}(t)}{dt},$$

$$f_{\text{АФАР}}(t) = (S_0 - m_S) C_{S_0}^{m_S} [1 - P_{\text{ПДР}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)P_{\text{ППМП}}(t)]^{m_S} [P_{\text{ПДР}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)P_{\text{ППМП}}(t)]^{S_0 - m_S - 1} f_{\text{ПДР}}(t) \quad (3.66)$$

Інтенсивність відмов АФАР визначається за формулою:

$$\Lambda_{\text{АФАР}}(t) = \frac{f_{\text{АФАР}}(t)}{P_{\text{АФАР}}(t)} \quad (3.67)$$

Гамма-відсотковий ресурс АФАР – $T_{\gamma_{\text{АФАР}}}$ визначається з вирішення рівняння:

$$P_{\text{АФАР}}(t = T_{\gamma_{\text{АФАР}}}) = \gamma_{\text{АФАР}} \quad (3.68)$$

Для визначення допустимого числа умовних відмов підрешіток в АФАР необхідно скласти і вирішити трансцендентне рівняння щодо m_S для середнього наробітку до відмови:

$$T_{0_АФАР_2} \geq T_{0_АФАР_1} \quad (3.69)$$

$$P_{\text{МВЖ}}(t = T_{0_АФАР_2})P_{\text{ППМП}}(t = T_{0_АФАР_2})P_{\text{ПІДР}}(t = T_{0_АФАР_2}) = 1 - \frac{m_S}{s_0} - \frac{1}{s_0} \quad (3.70)$$

Імовірність безвідмовної роботи антенної підрешітки в рівнянні (3.70) визначається за допустимої кількості відмов ППК (МВЖ) - $m_G = \frac{\Delta N}{N_0} G_0$.

Отже, визначивши раніше значення $T_{0_АФАР_1}$, з рішення рівняння (3.61), знаходимо значення $T_{0_АФАР_2}$ з рівняння (3.70) (з урахуванням виконання умови (3.69)) і визначаємо допустиму кількість умовних відмов підрешіток – m_S з допустимою кількістю відмов ППК – m_G у кожній підрешітці. На підставі певних значень m_G і m_S надалі визначаються імовірні показники надійності АФАР.

Приклад 3.6

Визначити середній наробіток до відмови, РБП і відносну кількість відмов ППК для різних значень допустимої кількості відмов в антенній

підрешітці – m_G і допустимої кількості умовних відмов підрешіток - m_S для АФАР на 6400 ППК.

Вихідні дані ті ж, що і для прикладу 3.5.

Рішення рівняння (3.61) за допустимим рівнем РБП, яке дорівнює – 47,95 дВ, відповідає відносному середньому наробітку до відмови АФАР:

$$\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ППК}} = 0,0062865; \quad (\Delta N/N_0)_1 = 0,01001;$$

$$T_{0_АФАР_1} = 0,0062825 \times T_{0_ППК} = 0,0062825 \times 50\,000 = 314 \text{ ч.}$$

Рішення рівняння (3.70) за $m_G = 5$, $m_S = 5$ відповідає відносному середньому наробітку до відмови АФАР:

$$\frac{T_{0_АФАР_2}}{T_{0_ППК}} = 0,03483 \text{ (РБП – 41,83 дВ, погіршення РБП на 9,12 дВ),}$$

$$T_{0_АФАР_2} = 0,03483 \times 50000 = 1741,5 \text{ год.}$$

$$i \Delta N/N_0 \left(\frac{T_{0_АФАР_2}}{T_{0_ППК}} = 0,03483 \right) = 0,0542, \quad \Delta N = 347 \text{ ППК,}$$

що відповідає наступному розподілу відмов ППК у антенних підрешітках:

$$\Delta N = (5+1) \times (5+1) + 5 \times 21 + 4 \times 24 + 3 \times 20 + 2 \times 21 + 1 \times 8 = 347 \text{ ППК,}$$

$$\text{Перевірка: } S = 6 + 21 + 24 + 20 + 21 + 8 = 100 \text{ підрешіток}$$

У табл. 3.2 представлені рішення трансцендентних рівнянь (3.61, 3.70) для визначення ІБР приймально-передавальної АФАР у режимі прийому за

різними значеннями допустимої кількості відмов ППК в антенній підрешітці - m_G і допустимої кількості умовних відмов антенних підрешіток в АФАР - m_S .

Таблиця 3.2

Результати рішення прикладів 3.5 і 3.6

$[\log(q_{\Sigma})]_1 / \Delta \log(q_{\Sigma})$	$(\Delta N/N_0)_1$	$(T_{0_A}/T_{0_ППК})_1$	m_G	m_S	$[\log(q_{\Sigma})]_2$	$(\Delta N/N_0)_2$	$(T_{0_A}/T_{0_ППК})_2$
-47,952/3,0	0,01001	0,00629	2	1	-47,65	0,0113	0,00708
-44,952/6,0	0,02600	0,01646	4	4	-44,75	0,0274	0,01737
-41,952/9,0	0,05279	0,03390	5	5	-41,83	0,0542	0,03483
-38,952/12,0	0,09528	0,06258	7	11	-38,85	0,0970	0,06377
-35,952/15,0	0,14406	0,09722	10	12	-35,85	0,1457	0,09839
-32,952/18,0	0,18816	0,13028	19	22	-32,80	0,1903	0,13194

На рис. 3.15 представлені графіки імовірності безвідмовної роботи приймально-передавальної аналогової АФАР в режимі прийому.

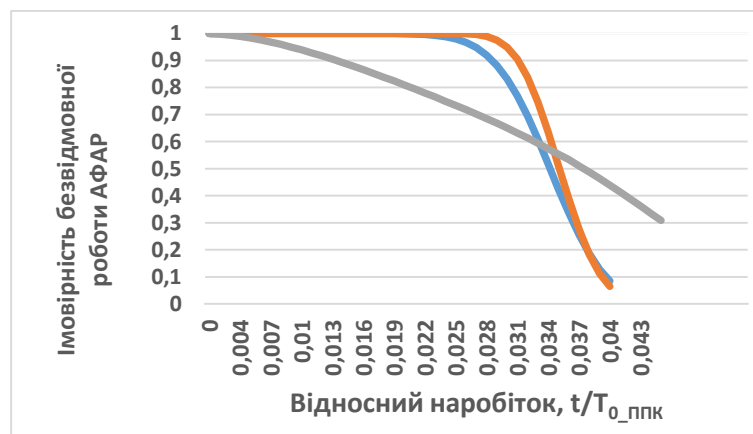


Рис. 3.15 Графіки імовірності безвідмовної роботи приймально-передавальної АФАР $P_{APAR}(t/T_{0_ППК})$ за різної кількості ППК, що відмовили і умовних відмов

антенних підрешіток під час погіршення РБП на 9 dB (від значення – 50,95 dB до значення - 41,95 dB): графік фіолетового кольору – за $m_G = 8$, $m_S = 1$; графік синього кольору – за $m_G = 5$, $m_S = 5$; графік червоного кольору – за $m_G = 4$, $m_S = 13$.

Як видно з рис. 3.15 зі збільшенням кількості умовних відмов підрешіток графіки ІБР все ближче наближаються до виду нормального розподілу.

Приклад 3.7 *Розрахунок показників надійності приймальної АФАР РЛС*

Структурна схема надійності приймальної АФАР РЛС включає:

$N_0 = 6400$ - загальна кількість приймальних каналів; $S_0 = 100$ - кількість приймальних антенних підрешіток; $G_0 = 64$ - кількість приймальних каналів в приймальній антенній підрешітці;

$m_G = 6$ - допустима кількість відмов приймальних каналів в приймальній антенній підрешітці;

m_S - допустима кількість відмов приймальних антенних підрешіток в приймальній АФАР.

Відмови приймальних каналів і модулів вторинного живлення розподіляються за експоненціальним законом (раптові відмови).

Інтенсивності відмов приймальних каналів антенних модулів:

$\lambda_{\text{АПРМК}} = 0,0000007 \text{ год}^{-1}$. Інтенсивність відмов. приймальних каналів модулів антенної підрешітки: $\lambda_{\text{ЛПРМК}} = 0,0000007 \text{ год}^{-1}$. Інтенсивності відмов модулів вторинного живлення $\lambda_{\text{МВЖ}}$ змінюються в діапазоні від

$0,000005 \text{ год}^{-1}$ до $0,000020 \text{ год}^{-1}$.

Допустима кількість відмов приймальних антенних підрешіток в приймальній АФАР m_S , змінюється від 1 до 5. На рис. 3.16 представлені графіки залежностей середнього наробітку до відмови приймальної АФАР від інтенсивностей відмов модулів вторинного живлення при різних значеннях припустимої кількості відмов приймальних антенних підрешіток.

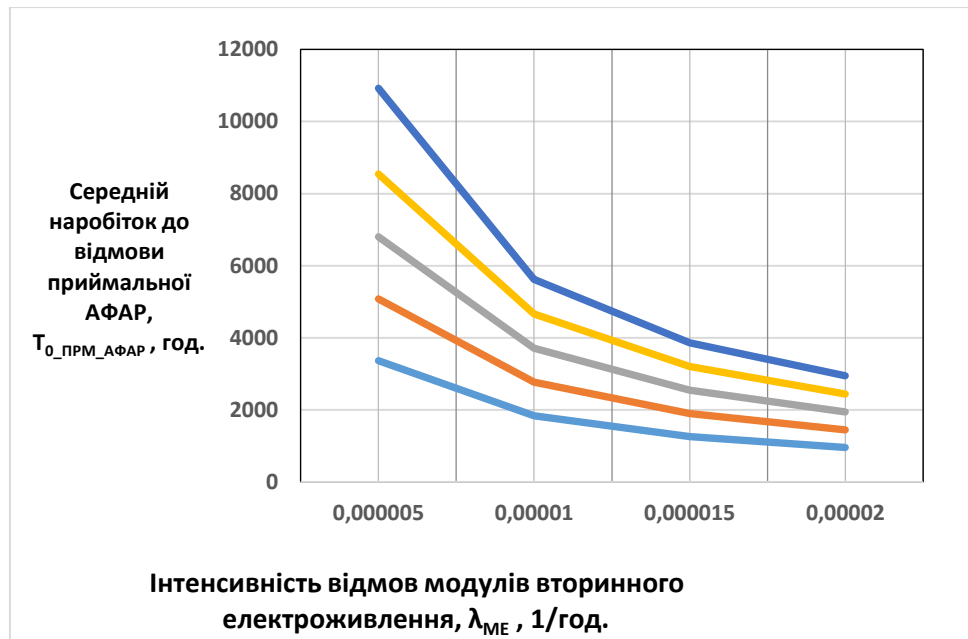


Рис. 3.16 Графіки залежності середнього наробітку до відмови приймальної АФАР - $T_{0_ПРМ_АФАР}$ від інтенсивностей відмов модулів вторинного електроживлення $\lambda_{МЕ}$ при різних значеннях допустимої кількості відмов антенних підрешіток m_s : при $m_s = 1$ - синя лінія; при $m_s = 2$ - червона лінія; при $m_s = 3$ - зелена лінія; при $m_s = 4$ - фіолетова лінія; при $m_s = 5$ - блакитна лінія

3.7.4 Побудова математичної моделі надійності аналогово-цифрової активної фазованої антенної решітки у режимі прийому

Для аналого-цифрової 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 рівня за допустимої кількості відмов антенних підрешіток - m_s :

$$[P_{МВЖ}(T_{0_АФАР})]^2 P_{ППМП}(T_{0_АФАР}) P_{ПДР}(T_{0_АФАР}) = 1 - \frac{m_s}{S_0} - \frac{1}{S_0} \quad (3.71)$$

Використовуючи значення середнього наробітку до відмови – $T_{0_АФАР}$ і значення допустимої кількості відмов приймально-передавальних антенних підрешіток – m_s дворівневої АФАР, визначаються ІБР за формулою:

$$P_{АФАР}(t) = \sum_{j=0}^{m_s} C_{S_0}^j [P_{ПІДР}(t)P_{МВЖ}(t)P_{ППМП}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{ПІДР}(t)P_{МВЖ}(t)P_{ППМП}(t)]^j \quad (3.72)$$

де ІБР антенної підрешітки визначається за формулою:

$$P_{ПІДР}(t) = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [P_{ППК}(t)P_{МВЖ}(t)]^{G_0-i} [1 - P_{ППК}(t)P_{МВЖ}(t)]^i \quad (3.73)$$

Приклад 3.8

Необхідно визначати середній наробіток до відмови АФАР РЛС за критерієм допустимої кількості відмов антенних підрешіток (допустимого погіршення РБП) в режимі роботи на прийом.

Вихідні дані: $T_{0_ППК} = 100\,000$ год., $T_{0_ППМП} = 100\,000$ год., $T_{0_МВЖ} = 1\,000\,000$ год.

На рис. 3.17 Представлено графіки залежності середнього наробітку до відмови АФАР в режимі прийому від допустимої кількості відмов антенних підрешіток при різних значеннях допустимої кількості відмов ППК в антенній решітці.

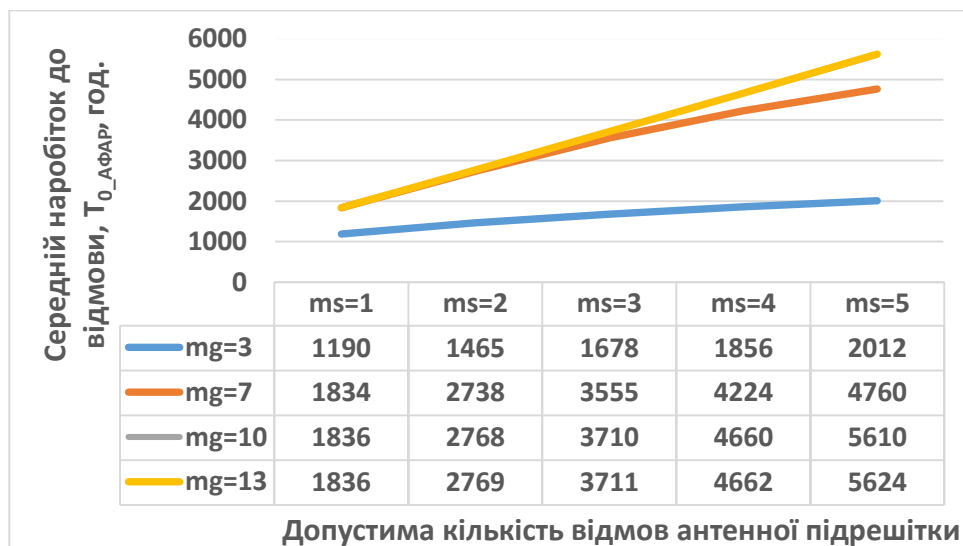


Рис. 3.17 Графіки залежності середнього наробітку до відмови АФАР в режимі прийому від допустимої кількості відмов антенних підрешіток при різних значеннях допустимої кількості відмов ППК в антенній решітці : $m_g = 3$ ($\Delta N/N_0 = 0,05\%$) – синя лінія, $m_g = 7$ ($\Delta N/N_0 = 0,10\%$) – червона лінія, $m_g = 10$ ($\Delta N/N_0 = 0,15\%$) – фіолетова лінія, $m_g = 13$ ($\Delta N/N_0 = 0,20\%$) – жовта лінія.

Із рис. 3.17 слідує що зі збільшенням допустимої кількості відмов ППК в антенній підрешітці з 5% до 20% ППК середній наробіток до відмови збільшується від 1,69 до 3,06 разів. При 20% зростання середнього наробітку до відмови припиняється.

3.8 Доказ адекватності математичної моделі надійності активної фазованої антенної решітки, що не обслуговується, по відношенню до класичної моделі надійності резервованої невідновлювальної структури з навантаженим ковзаючим резервом

3.8.1 Загальні положення

Доказ адекватності математичної моделі надійності АФАР, що не обслуговується по відношенню до класичної моделі надійності резервованої невідновлювальної структури з навантаженим ковзаючим резервом

Класична (традиційна) математична модель розрахунку надійності резервованої невідновлювальної структури з навантаженим ковзаючим резервом (що складається з n - робочих і m резервних ідентичних елементів) відповідно до [161] визначається наступними формулами:

- для імовірності безвідмовної роботи системи $P_c(t_0)$ для довільних розподілів відмов елементів:

-

$$- P_c(t_0) = \sum_{j=0}^m C_{n+m}^j P^{n+m-j} q^j \quad - \text{точне значення (3.74)}$$

-

$$- P_c(t_0) \approx 1 - C_{n+m}^{m-1} q^{m+1} \quad - \text{приблизне значення (3.75)}$$

для середнього наробітку до відмови при експоненціальному законі розподілу відмов елементів:

$$T_{0c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=0}^m \frac{1}{n+m-j} - \text{точне значення} \quad (3.76)$$

$$T_{0c} \approx \frac{1}{\lambda_0} \left[\ln \left(\frac{n+m}{n} \right) - \frac{m}{n(n+m)} \right] - \text{приблизне значення} \quad (3.77)$$

де: $p = p(t_0)$ и $q = q(t_0)$ імовірність безвідмовної роботи і імовірність відмови елемента за оперативний час t_0 .

3.8.2. Нова математична модель для розрахунку надійності невідновлювальної активної фазованої антенної решітки з однорівневою структурною схемою надійності

Вихідні дані:

а) структура АФАР, що не обслуговується, яка знаходиться в початковому моменті часу ($t_0 = 0$) в справному стані, включає $N(t_0 = 0) = n + m$ працездатні приймально-передавальні канали (ППК), з яких n - робочі і m - резервні канали;

б) критерієм відмови структури ФАР, що не обслуговується є відмова $(m+1)$ - го елемента в момент часу $t_0 = T_0$, тобто виконання умови:

$$N(t_0) = N(t_0 = 0) - m - 1 \quad (3.78)$$

Далі отримаємо таку умову відмови:

$$N(t_0 = 0) = n + m \quad (3.79)$$

Загальна кількість працездатних ППК в резервованій структурі АФАР також можна визначити через імовірність безвідмовної роботи як:

$$N(t_0) = N(t_0 = 0)P(t_0) \quad (3.80)$$

За цим при експоненційному законі розподілу відмов ППК в структурі АФАР аналітичний вираз (3.80) перетворюється у такий спосіб:

$$N(t_0) = (m + n)\exp(-\lambda_0 t_0) \quad (3.81)$$

Використовуючи умову відмови (3.79) і аналітичний вираз (3.81) отримаємо рівняння для визначення середнього наробітку до відмови невідновлювальної структури АФАР:

$$(m + n) \exp(-\lambda_0 t_0) = n - 1 \quad (3.82)$$

Рішення рівняння (3.82) дозволяє отримати аналітичний вираз для середнього наробітку до відмови невідновлювальної структури АФАР:

$$T_{0_c} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{m+n}{n-1} \quad (3.83)$$

3.8.3 Перевірка адекватності математичної моделі надійності активної фазованої антенної решітки з однорівневою структурною схемою надійності

З порівняння формул (3.76) і (3.83), слідує що формула (3.83) зручніша для проведення інженерного аналізу надійності АФАР (середнього наробітку до відмови) вже при кількості елементів в структурі 200 і більше.

Для проведення порівняння класичної та розробленої математичних моделей надійності розглядаються приклади розрахунку показників надійності для трьох варіантів АФАР - резервованих структур з навантаженим ковзаючим резервуванням.

Вихідні дані для розрахунків надійності трьох варіантів структур ФАР представлені в таблиці 3.1.

Для класичної моделі надійності резервованої структури зі змінним резервуванням за формулами (3.76) і (3.77) визначаються точний і наближений значення середнього наробітку до відмови структури АФАР.

Для нової розробленої моделі розрахунку надійності ФАР за формулою (3.83) визначаються значення середнього наробітку до відмови. Результати розрахунків середнього наробітку до відмови і структури ФАР показані в таблицях 3.3 і 3.4.

У таблиці 3.5 представлені значення відносних похибок при визначенні показників надійності АФАР для класичної і нової моделей розрахунку надійності.

Таблиця 3.3

**Вихідні дані для розрахунку показників надійності
для різних структур АФАР**

Варіанти структур АФАР	Вихідні дані для розрахунку показників надійності для різних структур АФАР			
	Оперативний час роботи, t_0 , год.	Інтенсивність відмов ППК, λ_s , 1/год.	Кількість основних ППК,	Кількість резервних ППК,
АФАР - 1	500	10	10	2
АФАР - 2	500	5	96	4
АФАР - 3	500	0,5	480	20

Таблиця 3.4

Середній наробіток до відмови різних структур АФАР

Варіанти структур АФАР	Середній наробіток до відмови АФАР, год		
	Точне значення, розраховане за класичною моделлю	Наближене значення, розраховане за класичною моделлю	Точне значення, розраховане за новою моделлю
АФАР - 1	2842	1656	2876
АФАР - 2	1021	808	1026
АФАР - 3	8572	8148	8581

Таблиця 3.5

Значення відносної помилки визначення середнього наробітку до відмови для різних структур АФАР

Варіанти структур АФАР	Значення відносної помилки визначення середнього наробітку до відмови для різних структур АФАР в %	
	За наближеною формулою класичної моделі	за точною формулою нової розробленої моделі
АФАР - 1	41,0	1,20
АФАР - 2	20,8	0,51
АФАР - 3	4,95	0,10

З таблиці 3.5 видно, що використання наближеної формули (3.77) для визначення середнього наробітку до відмови АФАР, що не обслуговується, призводить до великої похибки (5-41)%, яка зменшується зі збільшенням кількості ППК в резервованій структурі. Використання формули (3.83),

отриманої для нової моделі, призводить до значно меншою похибки (1,2 % при 10 елементах і 0,100 % при 480 елементах в структурі АФАР), яка швидко зменшується до нуля зі збільшенням кількості вище 1000 елементів.

В сучасних АФАР рахують тисячі і десятки тисяч прийнятно-передавальних каналів і модулів, тому похибка визначення середнього наробітку до відмови надлишкової структури АФАР при використанні нової розробленої дисертантом моделі буде складати значно менше 0,1%. Це говорить про те що нова математична модель повністю придатна для розрахунків надійності будь-яких структур АФАР.

3.8.4 Перевірка адекватності математичної моделі надійності активної фазованої антенної решітки з k – рівневою структурною схемою надійності

Кількість відмовивших ППК у k - рівневій АФАР визначається за формулою (3.10):

$$\Delta N = N_0 \{1 - P_{\text{ППМ1}}(t) P_{\text{ППМ2}}(t) \dots P_{\text{ППМk}}(t) [P_{\text{МВЖ}}(t)]^k\}$$

Використовуючи формулу (3.10) з розділу 3.5.2 знаходимо рівняння для визначення середнього наробітку до відмови АФАР (3.11) :

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

Для експоненціального розподілу відмов каналів та АФАР рівняння (3.11) трансформується у формулу для визначення нормованої інтенсивності відмов передавальної АФАР:

$$\frac{\lambda_{\text{ППМ1}}}{\lambda_{\text{АФАР}}} = \frac{1 + \frac{\lambda_{\text{ППМ2}}}{\lambda_{\text{ППМ1}}} + \dots + \frac{\lambda_{\text{ППМк}}}{\lambda_{\text{ППМ1}}} + \dots + \frac{k\lambda_{\text{МВЖ}}}{\lambda_{\text{ППМ1}}}}{\ln \frac{1}{1 - \frac{\Delta N}{N_0} - \frac{1}{N_0}}} \quad (3.84)$$

Для визначення імовірності безвідмовної роботи активної фазованої антенної решітки з дворівневою ССН використовується математична модель розрахунку надійності дворівневої резервованої невідновлювальної структури зі ковзаючим резервом (що складається з n - робочих і m - резервних ідентичних елементів) [161]

Для визначення імовірності безвідмовної роботи АФАР з дворівневою ССН використовується формула (3.16) з підрозділу 3.5.2:

$$P_{\text{АФАР}}(t) = \sum_{j=0}^{m_S} C_{S_0}^j [P_{\text{ПДР}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)P_{\text{ППМП}}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{\text{ПДР}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)P_{\text{ППМП}}(t)]^j$$

де:

$P_{\text{ПДР}}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи антенної підрешітки визначається за формулою (3.13);

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

Адекватність математичної моделі АФАР з дворівневою ССН визначається за значенням імовірності безвідмовної роботи, рівному - 0,42 при наробітку АФАР, рівному середньому наробітку на відмову.

3.9 Висновки до третього розділу

1. Найбільший внесок в інтенсивність відмов АФАР (за однакової кількості інтенсивностей відмов складових каналів і модулів вторинного

електроживлення) вносять відмови модулів вторинного живлення (33%), значно менший внесок вносять відмови передавальних (випромінюючих) каналів (22%) і найменший внесок вносять відмови приймальних каналів (11%).

2. Для забезпечення високої надійності на стадії проектування приймально-передавальних АФАР необхідно забезпечити перевищення середнього наробітку до відмови модулів вторинного живлення не менше ніж в 10 - 20 разів по відношенню до середнього наробітку до відмови передавальних каналів.

3. Математична модель надійності фазованої антенної решітки може використовуватися також для розрахунку показників надійності приймальної, передавальної і приймально-передавальної напівактивної ФАР.

4. Перевірка на адекватність нової моделі надійності АФАР, що не обслуговується, в порівнянні з класичної моделлю надійності резервованої невідновлювальної структури з навантаженим ковзаючим резервом, 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.

Список публікацій здобувача за матеріалами третього розділу

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

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**)

2. 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*)

3. Kostanovskyi 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*)

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

5. Костановский В.В., Козачук О.Д., Мачалин И.А. Математическая модель надежности приемо-передающей АФАР в приемном режиме по критерию допустимого ухудшения уровня боковых лепестков. *Науковий журнал «Наукоємні технології», НАУ*. 2020, №3. С. 276-286.

6. Костановский В.В., Мачалин И.А. Разработка и исследование универсальной модели надежности активной фазированной антенной решетки РЛС. *Збірник наукових праць «Водний транспорт», ДУІТ*. 2020, вып. №1 (29), С. 31- 45

7. 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.

8. 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.

9. Костановський В.В. Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, які враховують раптови 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.

10. Костановський В.В. Синтез структури корабельних навігаційних комплексів по критерію надійності на ранніх стадіях проектування. *Науковий журнал «Системи управління, навігації та зв'язку»*, ЦНДІ НіУ, 2008, випуск 2(6) . С. 3-9.

11. Пояснювальна записка до технічного проекту 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.

12. 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», десятичний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р. - Головний конструктор Демченко О.В., співвиконавець Костановський В.В.

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

14. 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.

РОЗДІЛ 4

УДОСКОНАЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАДІЙНОСТІ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ ЗА ДОВІЛЬНИМИ РОЗПОДІЛАМИ ВІДМОВ ПРИЙМАЛЬНО- ПЕРЕДАВАЛЬНИХ КАНАЛІВ

4.1 Постановка завдань

Розділ 4 присвячений прогнозуванню та дослідженню показників надійності та ефективності у процесі експлуатації активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій, що не обслуговуються.

У розділі 4.2 буде визначена область існування прогнозованих показників надійності та ефективності у процесі експлуатації активних фазованих антенних решіток: відносного середнього наробітку до відмови, відносного зниження максимальної дальності і погіршення рівня бокових пелюстків.

У підрозділах 4.3 - 4.5 буде проведено системний аналіз характеристик надійності АФАР: середнього наробітку до відмови, імовірностей безвідмовної роботи, щільності розподілу і інтенсивності відмов активних фазованих антенних решіток при спільному прояві раптових і поступових відмов електрорадіовиробів за довільними розподілами відмов.

В підрозділі 4.6 буде удосконалено та досліджено метод визначення необхідної кількості запасних каналів і модулів активних фазованих антенних решіток за різними законами розподілу відмов.

4.2. Прогнозування технічного стану активної фазованої антенної решітки у 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 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 – $\Delta D/D_0$ і відносного наробітку до відмови АФАР – $T_{0_АФАР} / T_{0_ППК}$.

У табл. 4.1 представлена матриця можливих технічних станів АФАР (на 6400 ППК), що досліджувалася у дисертаційній роботі під час обліку тільки раптових відмов ППК (експоненціальний розподіл відмов) для діапазону зміни допустимої кількості відмов у 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%). У табл. 4.1 представлена тільки неповна матриця технічного стану розміром: $8 \times 6 = 48$ технічних станів.

Повна матриця технічних станів АФАР (на $N_0 = 64 \times 100 = 6400$ ППК) включає до свого складу 6400 станів (кількість елементів матриці).

З розгляду матриці в табл. 4.1 видно, що за однаковою кількістю відмов ППК мають місце різні технічні стани антенної решітки за різними співвідношеннями m_G і m_S .

Так характеристики елемента матриці з $m_G = 3$, $m_S = 0$ практично відповідають характеристикам елемента з $m_G = 2$, $m_S = 4$:

$$A: m_G = 3, m_S = 0$$

$$T_{0_A}/T_{0_ППК} = 0,0132; \Delta D/D_0 = 0,00655; \Delta N = 84.$$

$$B: m_G = 2, m_S = 4$$

$$T_{0_A}/T_{0_ППК} = 0,0130; \Delta D/D_0 = 0,00646; \Delta N = 82,44.$$

Характеристики елемента матриці з $m_G = 5$, $m_S = 1$ практично відповідає характеристикам елемента з $m_G = 4$, $m_S = 5$:

$$A: m_G = 5, m_S = 1$$

$$T_{0_A}/T_{0_ППК} = 0,0339; \Delta D/D_0 = 0,01682; \Delta N = 213,5$$

B: $m_G = 4, m_S = 5$

$T_{0_A}/T_{0_ПК} = 0,0335; \Delta D/D_0 = 0,0166; \Delta N = 210,8$

при забезпеченні зниження рівня максимальної дальності РЛС –
 $\Delta D/D_0 = 0,050$ можливо три різних станів (елементів матриці станів):

A: $m_G = 10, m_S = 4$

$T_{0_A}/T_{0_ПК} = 0,10479; \Delta D/D_0 = 0,05122; \Delta N/N_0 = 0,0995$

A. B: $m_G = 9, m_S = 9$

$T_{0_A}/T_{0_ПК} = 0,10475; \Delta D/D_0 = 0,0512; \Delta N/N_0 = 0,09975$

C: $m_G = 8, m_S = 16$

$T_{0_A}/T_{0_ПК} = 0,10286; \Delta D/D_0 = 0,0503; \Delta N/N_0 = 213,5$

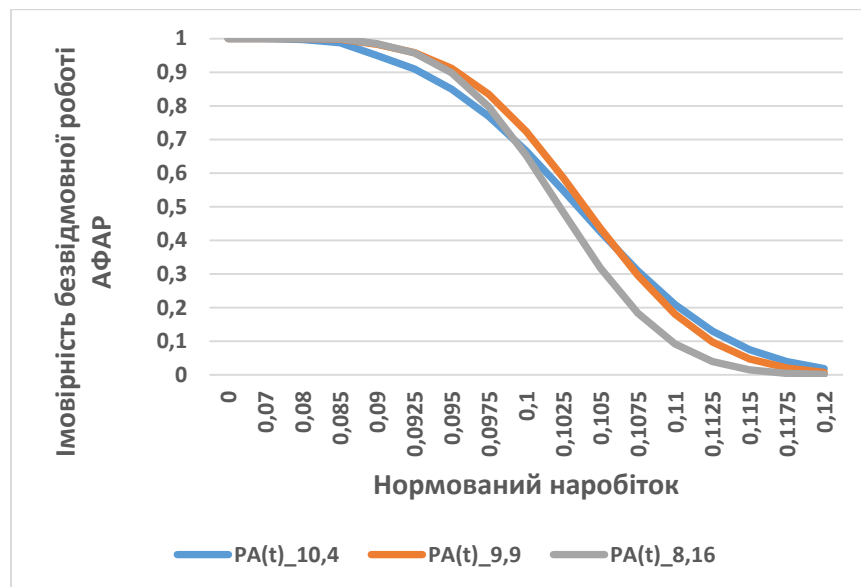


Рис. 4.1 Графіки імовірності безвідмовної роботи АФАР для допустимого зменшення максимальної дальності: $\Delta D/D_0 = 0,05$ за різною кількістю відмов ПК у антенній підрешітці і кількості умовних відмов антенних підрешіток

При забезпеченні зниження рівня максимальної дальності РЛС –
 $\Delta D/D_0 = 0,100$ можливо два різних станів (елементів матриці станів):

A: $m_G = 15, m_S = 14$

$T_{0_A}/T_{0_ПК} = 0,2122; \Delta D/D_0 = 0,1010; \Delta N/N_0 = 0,1912$

B. B: $m_G = 14, m_S = 22$

$$T_{0_A}/T_{0_ППК} = 0,21198; \Delta D/D_0 = 0,1009; \Delta N/N_0 = 0,1910$$

Діапазон зміни допустимої кількості відмов ППК – m_g знаходиться в межах від 1 до 10. Діапазон можливої зміни допустимих умовних відмов антенних підрешіток – m_s знаходиться в межах від 1 до 15.

Побудова матриці прогнозованих станів АФАР

Кількість елементів матриці становить 48, кожен (i, j) елемент матриці характеризується відповідними значеннями мінімального рівня РБП –

$G_\sigma(i, j)$, допустимого зниження рівня максимальної дальності дії РЛС – D/D_0 і середнього наробітку до відмови АФАР – $T_{0_АФАР}$.

Для вихідних даних матриці визначаються ІБР – $P_{АФАР}(t)$ і середній наробіток до відмови АФАР – $T_{0_АФАР}$, за умови допустимості відмови чотирьох ($m_G = 4$) ППК у антенній підрешітці для трьох різних значень кількості допустимих відмов підрешіток АФАР:

- допустима відмова 1-ої підрешітки ($m_s = 1$) - $T_{0_АРАР} = 2169$ год;
- допустима відмова 6-ти підрешіток ($m_s = 6$) - $T_{0_АРАР} = 4204$ год;
- допустима відмова 10-и підрешіток ($m_s = 10$) - $T_{0_АРАР} = 5083$ год.

Результати розрахунків показників надійності АФАР представлені на рис.

4.1. З рис. 4.1 видно, що ІБР АФАР:

- на інтервалі часу від 0 до 2168 год. зменшується від 1,00 до 0,420;
 - на інтервалі часу від 2168 год. до 2169 год. підвищується від 0,42 до 1,0;
 - на інтервалі часу від 2169 год. до 4203 год. зменшується від 1,0 до 0,42;
 - на інтервалі часу від 4203 год. до 4204 год. підвищується від 0,420 до 0,890;
 - на інтервалі часу від 4204 год. до 5083 год. зменшується від 0,890 до 0,420.
- З рис.4.1 також видно, що:

- на інтервалі часу від 0 до 2169 год. забезпечується значення РБП – $F_{\sigma}(4, 1)$;

- на інтервалі часу від 2169 год. до 4204 год. забезпечується значення РБП – $F_{\sigma}(4, 6)$;

- на інтервалі часу від 4204 год. до 5083 год. забезпечується значення РБП – $F_{\sigma}(10, 6)$.

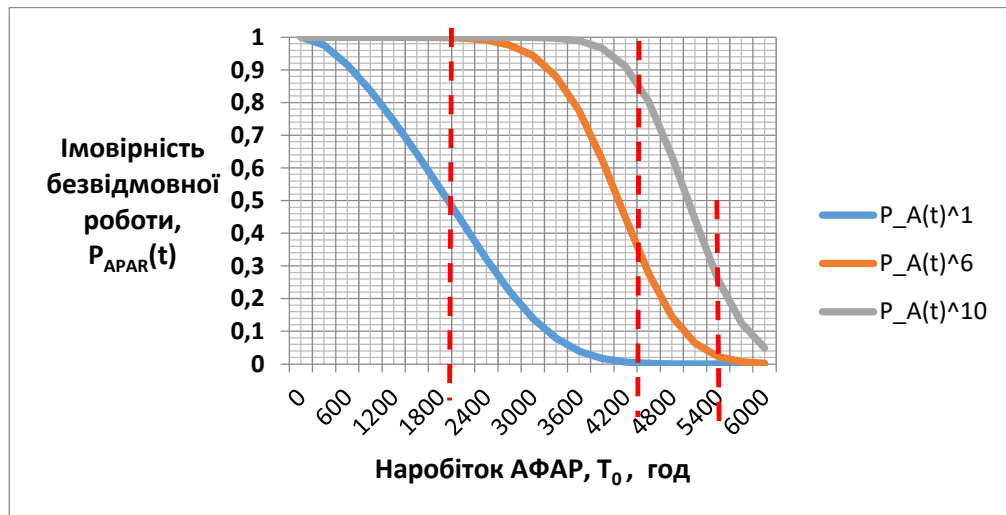


Рис. 4.2 Графіки імовірності безвідмовної роботи АФАР за різною кількістю допустимих відмов підрешіток АФАР (умовною відмовою антенної підрешітки вважається відмова $m_G = 4$ приймально-передавальних каналів): графік червоного кольору - припустима відмова однієї підрешітки ($m_S = 1$) - ($T_0 = 2169$ год); графік коричневого кольору - припустима відмова 6-и підрешіток ($T_0 = 4204$ год); графік зеленого кольору - допустима відмова 10-и підрешіток - ($T_0 = 5083$ год).

Таблиця 4.1

Матриця прогнозованих станів АФАР

m_G	$T_{0_A}/T_{0_ППК}, \Delta D/D_0, \text{Log}(q_\Sigma), \Delta N$					
	$m_S=0$	$m_S=1$	$m_S=2$	$m_S=3$	$m_S=4$	$m_S=5$
$m_G=0$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0001568;$ $\Delta D/D_0=0,00007841;$ $\Delta N=1,00344$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0003;$ $\Delta D/D_0=0,00016;$ $\Delta N=2,02$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0005;$ $\Delta D/D_0=0,00024;$ $\Delta N=3,04$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,00064;$ $\Delta D/D_0=0,00032;$ $\Delta N=4,08$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0008;$ $\Delta D/D_0=0,0004;$ $\Delta N=5,12$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0010;$ $\Delta D/D_0=0,00048;$ $\Delta N=6,2$
$m_G=1$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0023;$ $\Delta D/D_0=0,00117;$ $\Delta N=15$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0034;$ $\Delta D/D_0=0,00168;$ $\Delta N=22$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0042;$ $\Delta D/D_0=0,00210;$ $\Delta N=26,9$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,00493;$ $\Delta D/D_0=0,00246;$ $\Delta N=31,5$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0056;$ $\Delta D/D_0=0,00279;$ $\Delta N=35,7$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0062;$ $\Delta D/D_0=0,0031;$ $\Delta N=39,6$
$m_G=2$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0069;$ $\Delta D/D_0=0,00345;$ $\Delta N=44$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0090;$ $\Delta D/D_0=0,00449;$ $\Delta N=57,3$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0105;$ $\Delta D/D_0=0,00526;$ $\Delta N=67,1$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,01183;$ $\Delta D/D_0=0,00590;$ $\Delta N=75,3$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0130;$ $\Delta D/D_0=0,00646;$ $\Delta N=82,44$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,014;$ $\Delta D/D_0=0,007;$ $\Delta N=89$
$m_G=3$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0132;$ $\Delta D/D_0=0,00655;$ $\Delta N=84$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0162;$ $\Delta D/D_0=0,00809;$ $\Delta N=103,1$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0185;$ $\Delta D/D_0=0,00919;$ $\Delta N=117,1$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,02027;$ $\Delta D/D_0=0,0101;$ $\Delta N=128,5$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0218;$ $\Delta D/D_0=0,0109;$ $\Delta N=138,3$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0232;$ $\Delta D/D_0=0,0116;$ $\Delta N=147$
$m_G=4$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0206;$ $\Delta D/D_0=0,0103;$ $\Delta N=131$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0246;$ $\Delta D/D_0=0,01225;$ $\Delta N=155,8$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0275;$ $\Delta D/D_0=0,01365;$ $\Delta N=173,5$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,02978;$ $\Delta D/D_0=0,01478;$ $\Delta N=187,8$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0317;$ $\Delta D/D_0=0,01575;$ $\Delta N=200$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0335;$ $\Delta D/D_0=0,0166;$ $\Delta N=210,8$
$m_G=5$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,029;$ $\Delta D/D_0=0,01439;$ $\Delta N=182,9$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0339;$ $\Delta D/D_0=0,01682;$ $\Delta N=213,5$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0374;$ $\Delta D/D_0=0,001851;$ $\Delta N=235$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,04012;$ $\Delta D/D_0=0,01896;$ $\Delta N=251,7$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0425;$ $\Delta D/D_0=0,0210;$ $\Delta N=266$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0445;$ $\Delta D/D_0=0,0220;$ $\Delta N=278,7$
$m_G=6$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0382;$ $\Delta D/D_0=0,0189;$ $\Delta N=240$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,044;$ $\Delta D/D_0=0,02174;$ $\Delta N=275,3$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,048;$ $\Delta D/D_0=0,0237;$ $\Delta N=300$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,05114;$ $\Delta D/D_0=0,02525;$ $\Delta N=319,1$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0538;$ $\Delta D/D_0=0,02656;$ $\Delta N=335,4$	$T_{0_A}/T_{0_ППК}=0,0562;$ $\Delta D/D_0=0,0277;$ $\Delta N=349,7$

Прогнозування можливих показників ефективності відносного середнього наробітку до відмови, відносного зниження максимальної дальності і погіршення РБП дозволяє на етапі проектування АФАР правильно вибрати оптимальні структурні і технічні рішення під час розробки РЛС.

4.3 Перелік завдань, які вирішуються у процесі системного аналізу надійності активних фазованих антенних решіток

Вибір математичної моделі надійності АФАР:

- визначення режимів роботи антенної решітки, умов застосування і параметрів навколишнього середовища;
- побудова ССН структури АФАР;
- визначення переліку електронних модулів в складі АФАР.

Визначення показників безвідмовності і довговічності електронних модулів (складових частин структури АФАР) на основі статистичної інформації про надійність електрорадіовиробів.

Визначення показників безвідмовності АФАР:

- середнього наробітку до відмови АФАР

(середнього ресурсу - $T_{0\text{мод}}(T_{P\text{мод}})$);

- імовірності безвідмовної роботи АФАР за відносний оперативний

час роботи - $P_A\left(\frac{t_0}{T_{0\text{мод}}}\right)$

Визначення показників довговічності АФАР:

- гамма - відсоткового ресурсу ($\gamma = 0,95; 0,98; 0,99$);

- середнього ресурсу ($\gamma = 0,332 \div 0,500$).

4.4 Системний аналіз моделей надійності активних фазованих антенних решіток з раптовими та поступовими відмовами модулів надвисокої частоти

Загальні положення

У даному підрозділі розглядаються математичні моделі надійності АФАР з однорівневою структурною схемою надійності (однорівнева АФАР) за різними законами розподілу часу до відмови НВЧ модулів, що ураховують наявність раптових і поступових відмов. На основі отриманих формул і рівнянь будуються і аналізуються номограми для визначення ІБР, інтенсивності відмов і середнього наробітку до відмови типових структур АФАР для п'яти типів законів розподілу часу до відмови: експоненціального, Вейбулла, дифузійного немонотонного, узагальненого показового і суміші двох розподілів - експоненціального і Вейбулла.

Математичні моделі розрахунку показників безвідмовності і довговічності активної фазованої антенної решітки

Показниками безвідмовності однорівневою АФАР є ІБР - $P_A\left(\frac{t_0}{T_{0_МОД}}\right)$ за оперативний час t_0 і середній наробіток до відмови $T_{0_А}$. ІБР АФАР, яка включає n -робочих і m -резервних НВЧ модулів ($n + m = N$), визначається при використанні моделі надійності системи з ковзаючим резервуванням за формулою [160]:

$$P_A\left(\frac{t_0}{T_{0_МОД}}\right) = \sum_{j=0}^m C_N^j \left[P_{МОД}\left(\frac{t_0}{T_{0_МОД}}\right) \right]^{N-j} \left[1 - P_{МОД}\left(\frac{t_0}{T_{0_МОД}}\right) \right]^j, \quad (4.1)$$

де $P_{МОД}\left(\frac{t_0}{T_{0_МОД}}\right)$ – імовірність безвідмовної роботи електронного модуля;

$z_0 = \frac{t_0}{T_{0_мод}}$ відносний (відносно $T_{0_мод}$) час наробітку АФАР.

Показником довговічності структури АФАР є гамма-відсотковий ресурс T_{γ_A} , який визначаються з рішення трансцендентного рівняння

$$\gamma = \sum_{j=0}^m C_N^j [P_{мод}(z_\gamma)]^{N-j} [1 - P_{мод}(z_\gamma)]^j, \quad (4.2)$$

де $z_\gamma = \frac{t_\gamma}{T_{0_мод}}$.

Середній наробіток до відмови онорівневою АФАР - $T_{0_мод}$ визначається з вирішення трансцендентного рівняння (3.19):

$$P_{мод}(T_{0_A}) = \ln \frac{N-m-1}{N} \quad (4.3)$$

Аналітичні вирази для показників надійності НВЧ модулів АФАР, що враховують раптові та поступові відмови, для п'яти різних законів розподілу часу до відмови представлені у таблиці 4.2.

На рис. 4.3 – 4.4 представлені номограми імовірності безвідмовної роботи та нормованої інтенсивності відмов у залежності від нормованого оперативного часу роботи НВЧ модулів:

- для експоненціального розподілу (E-R),
- дифузійного немонотонного розподілу (DN-R),
- розподілу Вейбулла (W-R),
- узагальненого показового розподілу (OP-R);
- суміші розподілів – експоненціального та Вейбулла (E+WR).

Визначення. Критерієм (умовою) відмови розподілу структури однорівневою АФАР, яка включає $N = n + m$ НВЧ модулів (n - основних та m - резервних модулів), є відмова $m + 1$ модуля у момент часу $t_0 = T_{0_A}$. Умова відмови АФАР аналітично формується так:

$$N(t_0 = T_{0_A}) = N - m - 1 \quad (4.4)$$

Якщо $N(t_0 = T_{0_A}) = NP_M(t_0 = T_{0_A})$, то із урахуванням виразу (4.4) формуються рівняння (4.5) та (4.6) для визначення середнього наробітку до відмови однорівневою АФАР:

$$P_M(T_{0_A}) = 1 - \frac{m}{N} - \frac{1}{N}, \quad (4.5)$$

або

$$\frac{N-m-1}{N} = P_M(T_{0_A}) \quad (4.6)$$

де $P_M(t_0)$ - імовірність безвідмовної роботи НВЧ модулів

За вирішеннями рівняннями (4.6) виводяться формули (4.7) та (4.8) для визначення нормованого середнього наробітку до відмови - T_{0_A} АФАР:
 - для експоненціального розподілу наробітку до відмови НВЧ модулів (табл. 2).

$$\frac{T_{0_A}}{T_{0_M}} = -\ln\left(1 - \frac{m}{N} - \frac{1}{N}\right) \quad (4.7)$$

- для розподілу Вейбулла наробіток до відмови НВЧ модулів:

$$\frac{T_{0_A}}{T_{0_M}} = \frac{[-\ln(1 - \frac{m}{N} - \frac{1}{N})]^{1/b}}{\Gamma(1 + \frac{1}{b})} \quad (4.8)$$

Нормований середній наробіток до відмови АФАР є функцією коефіцієнта надмірності $K_{\text{надм.}} = \frac{m}{N}$, тобто $\frac{T_{0_A}}{T_{0_M}} = f\left(\frac{m}{N}\right)$.

Для визначення середнього наробітку до відмови АФАР під час дифузійного немонотонного розподілу, узагальненого показового розподілу та

суміші розподілів (експоненціальному та Вейбулла) часу до відмови НВЧ модулів застосовується рішення трансцендентних рівнянь (4.7) або (4.8)

Таблиця 4.2

Формули для розрахунку показників надійності п'яти різних розподілів часу до відмови НВЧ модулів

Тип розподілу часу до відмови НВЧ модулів	Формули для імовірності безвідмовної роботи, щільності розподілу часу до відмови і інтенсивності відмов НВЧ модулів,	Примітка , $z_0 = \frac{t_0}{T_{0_M}}$
Експоненціальний розподіл	$P_M(z_0) = \exp(-z_0), \quad \Lambda_M(z_0) = \frac{f_M(z_0)}{P_M(z_0)}$ $f_M(z_0) = \lambda_M \exp(-z_0),$ $\Lambda_M(z_0) = \lambda_M$	t_0 – час оперативної роботи, $T_{0_M} = \frac{1}{\lambda_M}$ середній наробіток до відмови
Розподіл Вейбулла	$P_M(z_0) = \exp[-(K_b z_0)^b]$ $f_M(z_0) = b K_b (K_b z_0)^{b-1} \exp[-(K_b z_0)^b]$ $\Lambda_M(z_0) = b K_b (K_b z_0)^{b-1}$	$T_{0_M} = a K_b$ $K_b = \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$ гамма-функція
Дифузійний немонотонний розподіл	$P_M(z_0) = \Phi\left(\frac{1-z_0}{\sqrt{z_0}}\right) - \exp\left(\frac{z_0}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+z_0}{\sqrt{z_0}}\right),$ $f_M(z_0) = \frac{1}{\sqrt{\mu z_0} \sqrt{2\pi z_0}} \exp\left[-\frac{(1-z_0)^2}{2v^2 z_0}\right]$	$T_{0_M} = \mu$
Узагальнений показовий розподіл	$P_M(z_0) = \left(1 - \frac{\eta}{\lambda}\right) \exp(-2z_0) + \frac{\eta}{\lambda} \exp\left(-\frac{2\eta}{\eta+\lambda} z_0\right),$ $f_M(z_0) = 2 \left[\left(\frac{\eta}{\lambda} - 1\right) \exp(-2z_0) - \frac{\eta^2}{\lambda(\eta+\lambda)} \exp\left(-\frac{2\eta}{\eta+\lambda} z_0\right) \right]$	$T_0 = \frac{2}{\lambda + \eta}$ $\eta = 4\lambda$
Суміш розподілів експоненціального та Вейбулла	$P_M(z_0) = 0,5 \exp(-0,625 z_0) + 0,5 \exp[-(2,5 K_b z_0)^b],$ $f_M(z_0) = \lambda \{ 0,5 \exp(-0,625 z_0) + 2 b K_b (2,5 K_b)^{b-1} \exp[-(2,5 K_b z_0)^b] \}$	$T_{0_M} = 0,5(T_{0_ER} + T_{0_WR}),$ $T_{0_ER} = 1 / \lambda,$ $T_{0_WR} = 0,25 / \lambda,$ $T_{0_M} = 0,625 / \lambda$

На рис. 4.3 і 4.4 представлені номограми для визначення імовірності безвідмовної роботи і інтенсивності відмов НВЧ модулів для п'яти різних розподілів відмов.

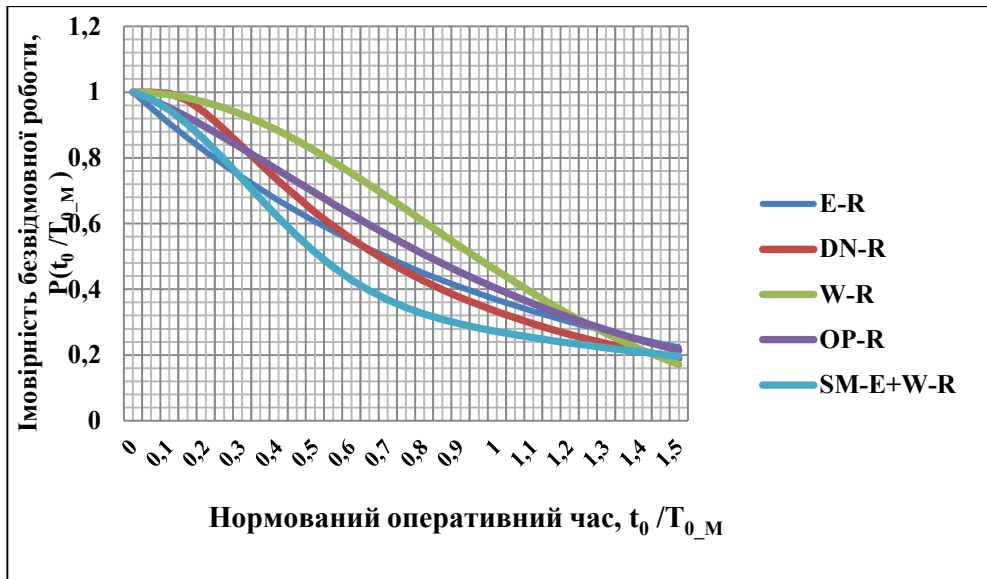


Рис.4.3 Номограми для визначення імовірності безвідмовної роботи для п'яти різних розподілів відмови НВЧ модулів

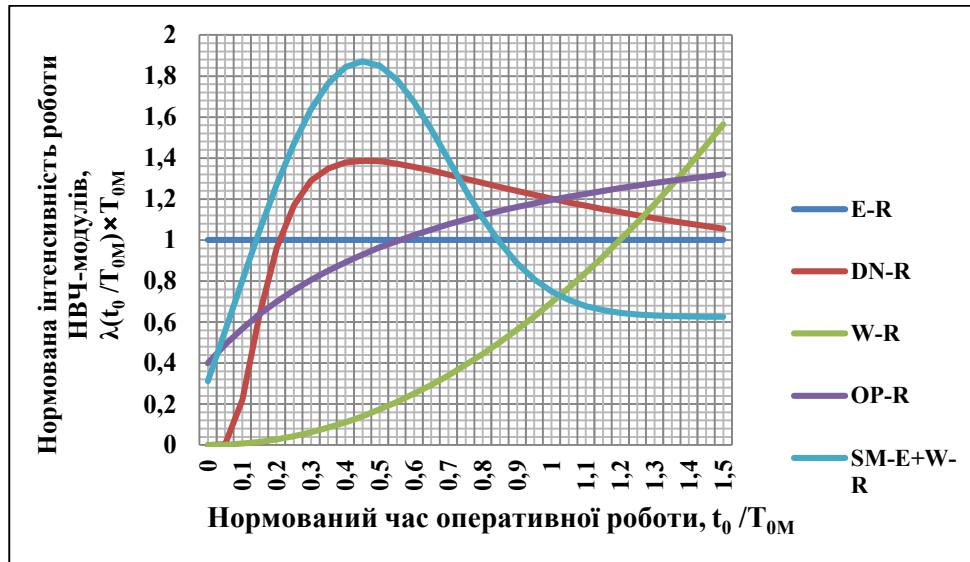


Рис. 4.4 Номограми нормованої інтенсивності відмов НВЧ-модулів для п'яти різних законів розподілу часу до відмови НВЧ каналів

Імовірність безвідмовної роботи $P_A(z_0)$, щільність розподілу $f_A(z_0)$, інтенсивності відмов $\Lambda_A(z_0)$ апертури ФАР, що включає n – робочих та

m – резервних НВЧ модулів, визначаються із застосуванням моделі надійності резервованої системи із дробовою кратністю за такими формулами [180]:

$$P_M(z_0) = \sum_{j=0}^m C_{n+m}^j [P_M(z_0)]^{n+m-j} [1 - P_M(z_0)]^j, \quad (4.9)$$

$$\frac{f_A(z_0)}{f_M(z_0)} = n C_{n+m}^m [1 - P_M(z_0)]^m [P_M(z_0)]^{n-1}, \quad (4.10)$$

$$\frac{\Lambda_A(z_0)}{\Lambda_M(z_0)} = \frac{n C_{n+m}^m [1 - P_M(z_0)]^m [P_M(z_0)]^{n-1}}{\sum_{j=0}^m C_{n+m}^j [P_M(z_0)]^{n+m-j} [1 - P_M(z_0)]^j} \quad (4.11)$$

де $P_M(z_0)$ – імовірність безвідмовної роботи підрешітки (каналу) (для структури приймальної ФАР) та НВЧ модуля (для апертури передавальної ФАР), $z_0 = \frac{t_0}{T_{0M}}$ - нормований (відносно T_{0M}) час до відмови АФАР.

4.5 Аналіз надійності різних структур приймальних та передавальних активних фазованих антенних решіток

*Типові структури приймальних ФАР,
які характеризуються 5% надмірністю*

- структура на 64 каналу, допустима відмова 3-х каналів. Тобто, загальна кількість каналів (основних та резервних) у приймальній ФАР складає $N = m + n = 64$, а кількість резервних каналів складає $m = 3$;

- структура на 256 каналів, допустима відмова 12 каналів.

Тобто, загальна кількість (основних та резервних) каналів у приймальній АФАР складає $N = n + m = 264$, а кількість резервних каналів складає $m = 12$.

*Типові структури передавальних ФАР,
які характеризуються 10% надмірністю:*

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

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

Приклад 4.2

Вихідними даними для системного аналізу безвідмовності і довговічності структур АФАР є дані, представлені для аналізу надійності електронного модуля.

Системний аналіз безвідмовності і довговічності проводився для трьох типових структур АФАР:

- 1-ша структура приймальні АФАР - загальне число приймальних каналів , кількість надлишкових (резервних) приймальних каналів – $m = 3$; ;

- 2-а структура передавальної АФАР - загальне число електронних НВЧ каналів, кількість надлишкових (резервних) НВЧ каналів – $m = 12$;

- 3-а структура приймальні АФАР - загальне число приймальних каналів, кількість надлишкових (резервних) приймальних каналів – $m = 25$.

В результаті аналізу визначено імовірність безвідмовної роботи (ІБР), середній наробіток до відмови, середній ресурс і гамма-відсотковий ресурс для типових структур АФАР.

На рис. 4.5 – 4.6 представлені криві для імовірності безвідмовної роботи двох однорівневих АФАР (1-а - $N = 64, m = 3$; 2-а - $N = 256, m = 25$) для трьох розподілів імовірності безвідмовної роботи - ЕР, ЕР×ВР і ЕР×ДНР.

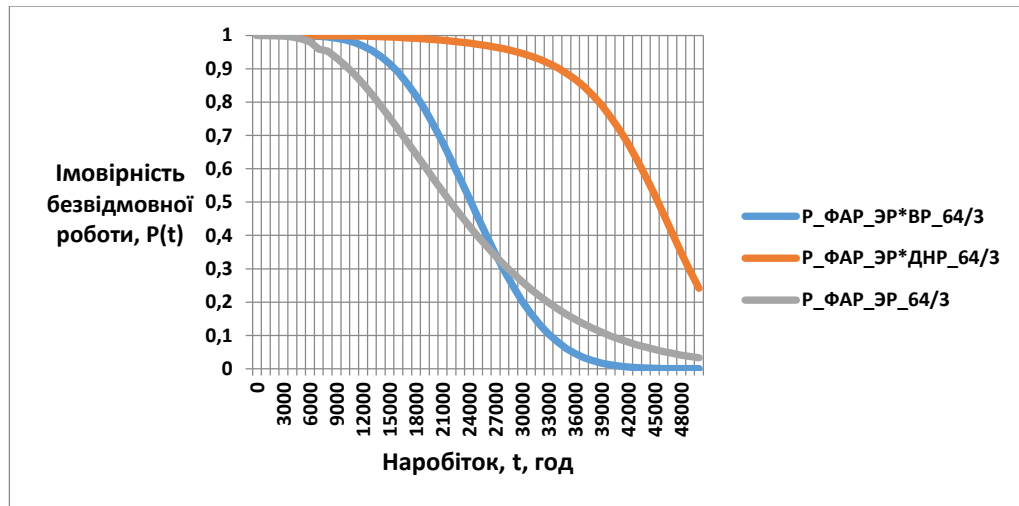


Рис. 4.5 Імовірність безвідмовної роботи однорівневої АФАР на 64 каналу (3 каналу надлишкові) при експоненціальному розподілі (ЕР) і двох композиціях розподілів відмов ЕРВ (ЕР×ВР і ЕР×ДНР) каналів АФАР

У табл. 4.3-4.5 представлені значення гамма-відсоткового ресурсу при $\gamma = 0,99; 0,98; 0,95$ трьох типових структур АФАР для трьох розподілів ВБР: ЕР, ЕР×ВР і ЕР×ВБР.

Таблиця 4.3

Гамма-відсотковий ресурс при $\gamma = 0,99$

Тип розподілу	АФАР 64/3	АФАР 256/12	АФАР 256/25
ЕР	4912	9097	23940
ЕР×ВР	9370	14302	25410
ЕР×ДНР	18866	31726	46547

Таблиця 4.4

Гамма-відсотковий ресурс при $\gamma = 0,98$

Тип розподілу	АФАР 64/3	АФАР 256/12	АФАР 256/25
ЕР	6063	10000	25481
ЕР×ВР	10885	15198	26284
ЕР×ДНР	23123	33498	47406

Таблиця 4.5

Гамма- відсотковий ресурс при $\gamma = 0,95$

Тип розподілу	АФАР 64/3	АФАР 256/12	АФАР 256/25
ЕР	8152	11470	27919
ЕР*ВР	13310	16566	27600
ЕР*ДНР	29528	35879	48636

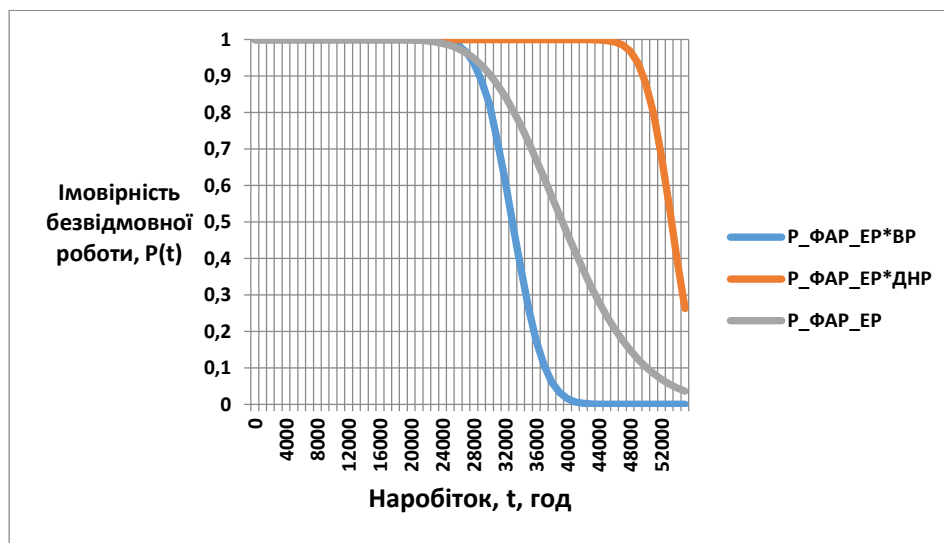


Рис. 4.6 Імовірність безвідмовної роботи АФАР на 256 каналів (25 каналів надлишкові) при експоненціальному розподілі (ЕР) і двох композиціях розподілів відмов ЕРВ (ЕР×ВР і ЕР×ДНР) каналів АФАР

У табл. 4.6 представлені значення середнього наробітку до відмови (середнього ресурсу) АФАР для трьох законів розподілу часу безвідмовної роботи: ЕР, ЕР×ВР і ЕР×ВНР

Таблиця 4.6.

Середній наробіток до відмови (середній ресурс) АФАР

Тип розподілу	АФАР 64/3	АФАР 256/12	АФАР 256/25
ЕР	24064	19432	39932
ЕР*ВР	25482	22634	33191
ЕР*ДНР	46636	43728	53501

Системний аналіз безвідмовності АФАР, представлених у прикладі 4.2, показав, що:

а) значення ІБР для приймальних структур $P_A\left(\frac{t_0}{T_{0_МОД}}\right)$:

- на $N=64$ каналу ($m=3$) і на $N=256$ каналів ($m=12$) для моделі ЕР×ДНР більше значень ІБР для моделі ЕР×ВР і, відповідно, значення ІБР для експоненціального розподілу менше значень ІБР для моделей ЕР×ВР і ЕР×ДНР;

б) на інтервалі наробітку решітки від 0 до 27 000 год значення ІБР для приймальних АФАР на $N=256$ каналів ($m=25$) змінюються аналогічно значенням ІБР розділу 5.8 (а);

в) на інтервалі наробітку АФАР від 27 000 год. і далі значення ІБР для моделі ЕР×ДНР більше значень ІБР для експоненціального розподілу і, відповідно, значення ІБР для моделі ЕР×ВР менше значень ІБР для моделі ЕР×ДНР і експоненціального розподілу;

г) значення середнього наробітку до відмови АФАР- T_{0_A} на $N=64$ каналу ($m=3$) і $N=256$ модулів ($m=12$) для моделі ЕР×ДНР в два рази більше ніж значення T_{0_A} для моделі ЕР×ВР і експоненціального розподілу;

д) значення середнього наробітку до відмови АФАР на $N=256$ каналів

($m=25$) для моделі EP×ДНР в 1,5 рази більше ніж значення T_{0_A} для моделі EP×ВР и експоненціального розподілу.

Аналіз показників довговічності типових структур АФАР показав, що найбільші значення гамма-відсоткового ресурсу T_γ відповідають моделі EP×ДНР, а найменші значення T_γ , в основному, експоненціальному розподілу.

Номограма для розрахунку нормованого середнього наробітку до відмови структур АФАР будуються на основі графічного рішення трансцендентного рівняння (4.12):

$$\frac{m}{N} = 1 - \frac{1}{N} - P_M \left(\frac{T_{0_A}}{T_{0_M}} \right) \quad (4.12)$$

На рис. 4.7 і табл. 4.7 представлені номограма (у графічному та чисельному вигляді) для розрахунку імовірності безвідмовної роботи АФАР за різними законами розподілу НВЧ каналів решітки.

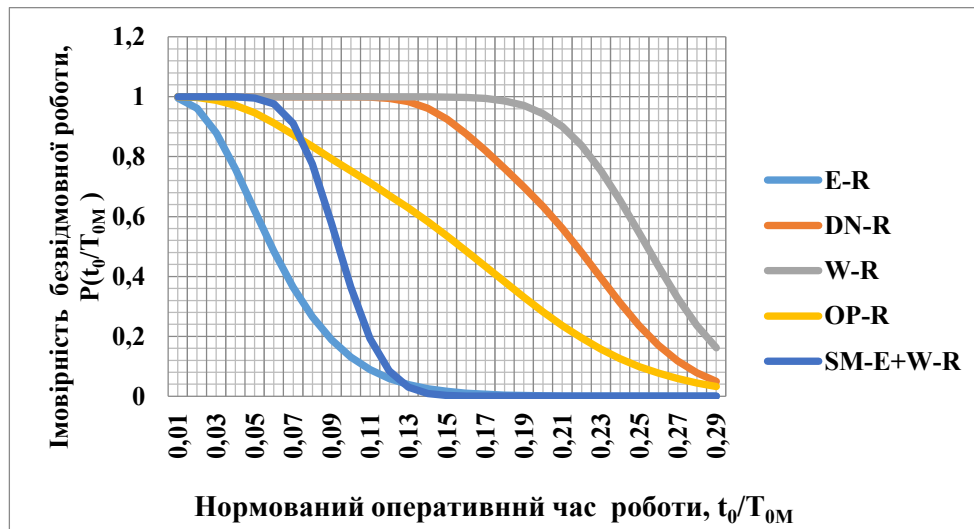


Рис. 4.7 Номограма для визначення імовірності безвідмовної роботи передавальної однорівневої АФАР (структура складається із 256 НВЧ каналів у тому числі 25-ти резервних каналів) для п'яти різних законів розподілу часу до відмови НВЧ каналів.

На рис. 4.8 і табл. 4.8 представлена номограма і таблиця для розрахунку нормованих інтенсивностей відмов типових структур АФАР за різними законами розподілу НВЧ каналів решітки.

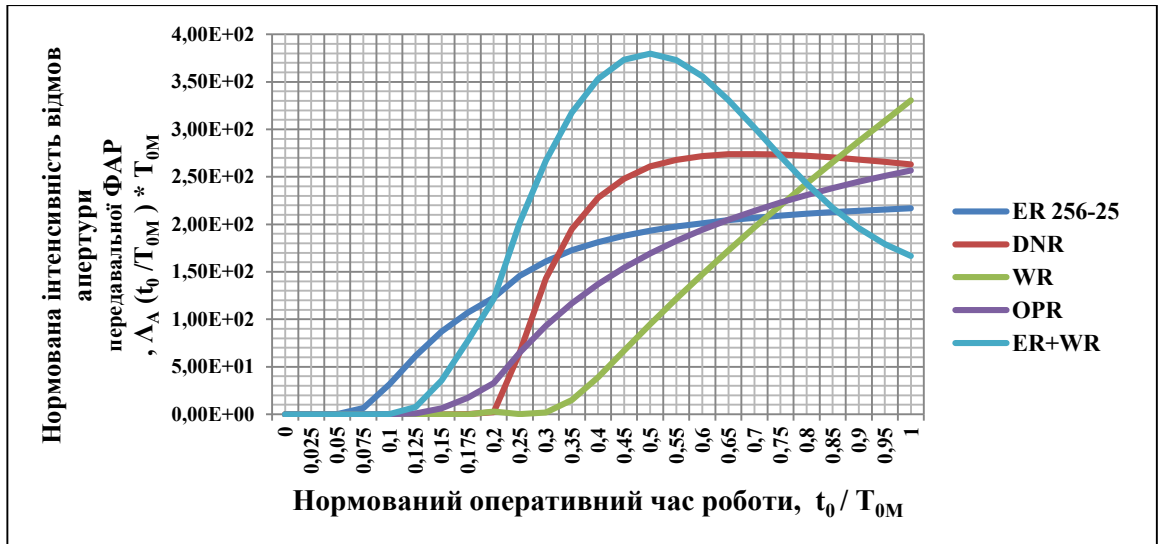


Рис. 4.9. Номограма для визначення нормованої інтенсивності відмов передавальної АФАР (структура складається із 256 НВЧ модулів, у тому числі 25-ти резервних модулів) для п'яти різних законів розподілу часу до відмови НВЧ модулів

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

Середній наробіток до відмови дворівневою АФАР - $T_{0_{АФАР_1}}$ за критерієм допустимого зніження максимальної дальності радіолокатора визначається з трансцендентного рівняння [41]:

$$\left(1 - \frac{AD}{D}\right)^4 = [P_{\text{пер.АМ}}(T_{0_{АФАР}}) + P_{\text{пер.МП}}(T_{0_{АФАР}}) + P_{\text{МЕ}}(T_{0_{АФАР}}) - 2]^2 [P_{\text{пр.АМ}}(T_{0_{АФАР}}) + P_{\text{пр.МП}}(T_{0_{АФАР}}) + P_{\text{МЕ}}(T_{0_{АФАР}}) - 2] \quad (4.13)$$

У формулі (4.13) імовірності $P_{\text{пер.АМ}}(T_{0_{АФАР}})$ відповідає імовірність $P_{\text{ППК}}(T_{0_{АФАР}})$. Враховуючи, що середній наробіток до відмови приймальних каналів АФАР, модулів джерел живлення і передавального каналу антенної підрешітки в десятки і сотні разів більше середнього наробітку до відмови передавального каналу АФАР рівняння (4.13) спрощується і має такий вигляд:

$$\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 \approx [P_{\text{ППК}}(T_{0_{\text{АФАР}}})]^2 \quad (4.14)$$

Формули для середнього наробітку до відмови для експоненціального розподілу і розподілу Вейбулла за допомогою рівняння (4.14) зображуються у такому вигляді:

- для експоненціального розподілу відмов ППК:

$$T_{0_{\text{АФАР}_{ER}}} \approx -\frac{2 \ln\left(1 - \frac{\Delta D}{D_0}\right)}{\lambda_{\text{ППК}}} \quad (4.15)$$

- для відмови ППК з розподілом Вейбулла:

$$T_{0_{\text{АФАР}_{1_{WR}}} \approx \frac{T_{0_{WR}} \left[-2 \ln\left(1 - \frac{\Delta D}{D_0}\right)\right]^{1/b}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \quad (4.16)$$

На рис. 4.9 представлена узагальнена номограма залежності відносного наробітку до відмови АФАР – $T_{0_{\text{АФАР}_{1}}} / T_{0_{\text{ППК}}}$ від допустимого рівня відносного зниження максимальної дальності РЛС для різних законів розподілу відмов ППК.

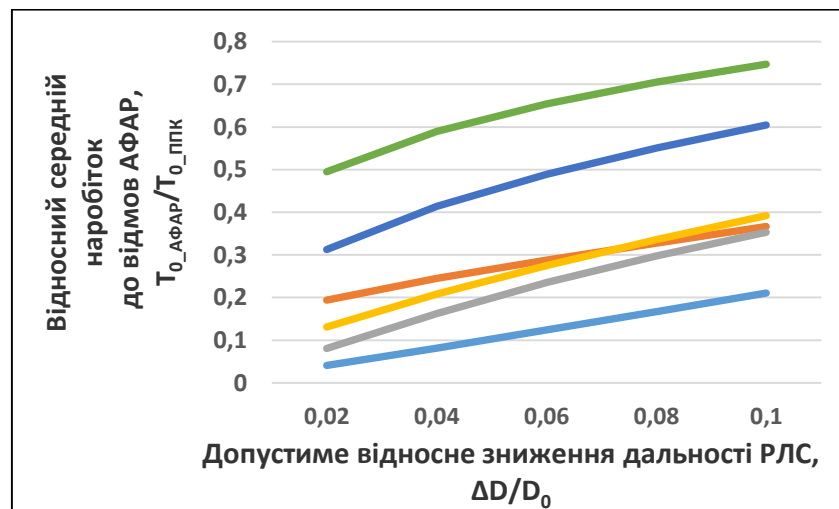


Рис. 4.10 Узагальнена номограма залежності відносного середнього наробітку до відмови антенної фазованою решітки – $T_{0_{\text{АФАР}_{1}}} / T_{0_{\text{ППК}}}$ від допустимого рівня зниження максимальної дальності РЛС за різними законами розподілу відмов ППК: експоненціального (ER) – лінія блакитного кольору; розподілу Вейбулла: 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 виграшем у надійності: за середнім наробітком на відмову G_T і за імовірністю відмови G_Q .

Таблиця 4.7

**Визначення імовірностей безвідмовної роботи типових
структур АФАР для різних розподілів часу до відмови НВЧ каналів**

Імовірність безвідмовної роботи АФАР					
z_0	E-R	DN-R	W-R	OP-R	SM(E+W)-R
Приймальна АФАР 64-3					
0,05	0,6190	1,0000	1,0000	0,9470	0,9510
0,10	0,1304	0,9999	0,9984	0,6364	0,5401
0,15	0,0163	0,9226	0,9740	0,2740	0,1208
0,20	0,0016	0,4110	0,8640	0,0804	0,0104
Приймальна АФАР 256-12					
0,05	0,5190	1,0000	1,0000	0,9950	0,9950
0,10	0,0032	1,0000	1,0000	0,5540	0,3647
0,15	0,0000012	0,9860	0,9993	0,0438	0,0024
0,20	0,000000	0,1641	0,9430	0,00053	0,000000
Передавальна АФАР 256-25					
0,05	0,9996	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,10	0,6062	1,0000	1,0000	0,9997	0,9983
0,15	0,0290	1,0000	1,0000	0,9190	0,5670
0,20	0,00014	0,9866	1,0000	0,3719	0,0017

Таблиця 4.8

**Визначення нормованих інтенсивностей відмов типових структур
АФАР для різних розподілів часу до відмови НВЧ каналів**

Нормована інтенсивність відмов АФАР					
z_0	E-R	DN-R	W-R	OP-R	SM(E+W)-R
Приймальна ФАР 64-3					
0,05	22,5	0,00	0,013	3,60	3,92
0,10	37,7	0,03	0,12	12,5	20,12
0,15	44,7	5,9	1,12	20,9	39,8
0,20	48,7	27,7	4,02	28,0	58,5
Приймальна АФАР 256-12					
0,05	54,3	0,00	0,00	0,90	0,84
0,10	137	0,00	0,00	29,2	54,6
0,15	172,3	2,5	0,081	70,9	145
0,20	191	85,6	3,7	103,9	224,6
Передавальна АФАР 256-25					
0,05	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10	31,6	0,00	0,00	0,05	0,333
0,15	87,0	0,00	0,00	6,1	35,7
0,20	123	2,2	2,8	32,8	121,4

Виграшем у надійності називається відношення показника надійності резервованої системи до відповідного показника надійності нерезервованої системи.

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

- для експоненціального розподілу часу до відмови НВЧ каналів:

$$G_T = -(N - m) \ln \left(1 - \frac{m}{N} - \frac{1}{N} \right), \quad (4.17)$$

- для розподілу Вейбулла часу до відмови НВЧ каналів:

$$G_T = \frac{(N - m) \left[-\ln \left(1 - \frac{m}{N} - \frac{1}{N} \right) \right]^{1/b}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right)}, \quad (4.18)$$

для довільного розподілу часу до відмови НВЧ каналів:

$$G_T = \frac{(N-m)T_{0_A}}{T_{0_M}}, \quad (4.19)$$

Де відношення $\frac{T_{0_A}}{T_{0_M}}$ визначається за рішенням трансцендентних рівнянь (4.13) або (4.14). Виграш у надійності за імовірністю до відмови визначається за формулою:

$$G_Q = \frac{1 - [P_M(z_0)]^{N-m}}{1 - \sum_{j=0}^m [P_M(z_0)]^{N-j} [1 - P_M(z_0)]^j} \quad (4.20)$$

У табл. 4.9 показані виграші у надійності за середнім наробітком до відмови G_T для типових структур ФАР за п'ятьма різними законами розподілу часу до відмови.

Таблиця 4.9

**Визначення виграшей у надійності за середнім наробітком
на відмову під час застосування типових структур АФАР для
різних розподілів часу до відмови НВЧ каналів**

Виграш у надійності за середнім наробітком на відмову	Експоненціальний розподіл	Узагальнений показовий розподіл	Суміш із двох розподілів: Експоненціального і Вейбулла	Розподіл Вейбулла	Дифузійний немонотонний розподіл
	Приймальна АФАР 64-3				
G_T	3,93	7,81	6,74	17,5	12,1
	Приймальна АФАР 256-12				
G_T	12,7	26,1	23,3	62,9	45,2
	Передавальна АФАР 256-25				
G_T	24,7	44,9	35,7	85,3	55,25

У табл. 4.10 показані виграші у надійності за імовірністю відмови G_Q для типових структур ФАР за п'ятьма різними законами розподілу часу до відмови (за нормований час до відмови $z_0 = 0,1$).

Таблиця 4.10

Визначення виграшів у надійності за імовірністю відмови під час застосування типових структур АФАР для різних розподілів часу до відмови НВЧ каналів

Виграш у надійності за імовірністю відмови	Експоненціальний розподіл	Узагальнений показовий розподіл	Суміш із двох розподілів: експоненціального і Вейбулла	Розподіл Вейбулла	Дифузійний немонотонний розподіл
	Приймальна АФАР 64-3				
$G_Q(z_0)$	1,15	2,61	2,10	233	1528
	Приймальна АФАР 256-12				
$G_Q(z_0)$	1,003	2,24	1,574	$5,09 \cdot 10^6$	$7,7 \cdot 10^9$
	Передавальна АФАР 256-25				
$G_Q(z_0)$	2,54	3809	579,3	$1,26 \cdot 10^{14}$	∞

4.6 Метод визначення необхідної кількості запасних каналів і модулів активних фазованих антенних решіток за різними законами розподілу відмов

4.6.1 Для визначення необхідної кількості запасних модулів антенної решітки за час $T_{\gamma_АФАР}$, що відповідає гамма-відсотковому ресурсу АФАР використовуються аналітичні вирази дворівневої математичної моделі надійності АФАР, що представлена у підрозділі 3.5.

Формула (3.13) для ІБР антенної підрешітки має вигляд:

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

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 ВП,
 m_G – допустима кількість відмов ППК у підрешітці,
 G_0 – загальна кількість ППК у підрешітки

Трансцендентне рівняння (3.12) для визначення середнього наробітку до відмови дворівневою АФАР має вигляд:

$$(\Delta N)_{\text{доп.}} + 1 = N_0 \{1 - P_{\text{ППК}}(T_{0\text{АФАР}_1}) P_{\text{ППМП}}(T_{0\text{АФАР}_1}) [P_{\text{МВЖ}}(T_{0\text{АФАР}_1})]^2\}$$

Формула (3.14) для ІБР АФАР має вигляд:

$$P_{\text{АФАР}}(t) = \sum_{j=0}^{m_S} C_{S_0}^j [P_{\text{ПІДР}}(t) P_{\text{МВЖ}}(t) P_{\text{ППМП}}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{\text{ПІДР}}(t) P_{\text{МВЖ}}(t) P_{\text{ППМП}}(t)]^j$$

де:

$P_{\text{ПІДР}}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи антенної підрешітки
 визначається за формулою (3.13);

$Q_{\text{ПІДР}}(t) = 1 - P_{\text{ПІДР}}(t)$ – імовірність умовної відмови антенної підрешітки;

m_S – допустима кількість умовних відмов підрешіток в АФАР;

S_0 – загальна кількість підрешіток в АФАР.

Використовуючи формулу (3.14) для ІБР АФАР і підставляючи її в рівняння (4.21), визначається гамма-відсотковий ресурс АФАР:

$$P_{\text{АФАР}}(T_{\gamma_{\text{АФАР}}}) - \gamma_{\text{АФАР}} = 0 \quad (4.21)$$

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

- для приймально-передавальних каналів (ППК):

$$Z_{\text{ППК}}(\gamma_{\text{АФАР}}) = N_{0_ППК} [1 - P_{\text{ППК}}(T_{\gamma_{\text{АФАР}}})] + 1, \quad (4.22)$$

- для приймально-передавальних модулів підreshітки (ППМП):

$$Z_{\text{ППМП}}(\gamma_{\text{АФАР}}) = S_0 [1 - P_{\text{ППМП}}(T_{\gamma_{\text{АФАР}}})] + 1, \quad (4.23)$$

- для модулів вторинного електроживлення (МВЖ)

$$Z_{\text{МВЖ}}(\gamma_{\text{АФАР}}) = N_{0_МВЖ} [1 - P_{\text{МВЖ}}(T_{\gamma_{\text{АФАР}}})] + 1 \quad (4.24)$$

4.6.3 Протягом заданого ресурсу РЛС - $T_{\text{ПРИЗН_РЕС_РЛС}}$ може проводитися кілька профілактичних (корегувальних заміни) каналів і модулів. Кількість (число) профілактичних заміни модулів, що відмовили - $\varepsilon_{\text{АФАР}}$ протягом заданого терміну служби визначається за формулою:

$$\varepsilon_{\text{АФАР}} = T_{\text{ПРИЗН_РЕС_РЛС}} / T_{\gamma_{\text{АФАР}}} \quad (4.25)$$

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:

$$Z_{\text{ППК}}(T_{\text{ПРИЗН_РЕС_РЛС}}) = \varepsilon_{\text{АФАР}} Z_{\text{ППК}}(\gamma_{\text{АФАР}}), \quad (4.26)$$

$$Z_{\text{ППМП}}(T_{\text{ПРИЗН.РЕС.РЛС}}) = \varepsilon_{\text{АФАР}} Z_{\text{ППМП}}(\gamma_{\text{АФАР}}), \quad (4.27)$$

$$Z_{\text{МВП}}(T_{\text{ПРИЗН.РЕС.РЛС}}) = \varepsilon_{\text{АФАР}} Z_{\text{МВП}}(\gamma_{\text{АФАР}}) \quad (4.28)$$

4.6.4 Визначення необхідної кількості запасних частин для забезпечення заданого ресурсу РЛС за різними розподілами відмов каналів і модулів [106].

У роботі були проведені обчислення необхідної кількості запасних частин за формулами (4.22 – 4.28) для забезпечення заданого ресурсу РЛС за такими розподілами відмов каналів і модулів: експоненціальному (ER), дифузійному немонотонному (DNR), композиції експоненціального і дифузійного немонотонного (ER/2×DNR/2), Вейбулла (WR). У табл. 4.11 представлені результати обчислень необхідної кількості запасних каналів і модулів за двома різними значеннями допустимої відносної кількості відмов ППК.

Таблиця 4.11

Потрібна кількість запасних ППК для АФАР ($N_{0_ППК} = 6400$), за допустимої відносної кількості відмов ППК для різних значень $\gamma_{\text{АФАР}}$: $\Delta N/N_0 = 0,10$ і $\Delta N/N_0 = 0,20$

$\gamma_{\text{АФАР}}$	$Z_{\text{АФАР}}(T_{\gamma_{\text{АФАР}}}, \Delta N/N_0 = 0,10)$	$Z_{\text{АФАР}}(T_{\gamma_{\text{АФАР}}}, \Delta N/N_0 = 0,20)$
0,458	642	1282
0,60	572	1192
0,70	524	1127
0,80	472	1052
0,90	405	953
0,95	355	891

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 визначалася потрібна кількість запасних каналів і модулів (мінімальні для ER і максимальні для DNR і WR). На рис. 4.11- 4.13 наведені номограми для визначення кількості запасних каналів і модулів.

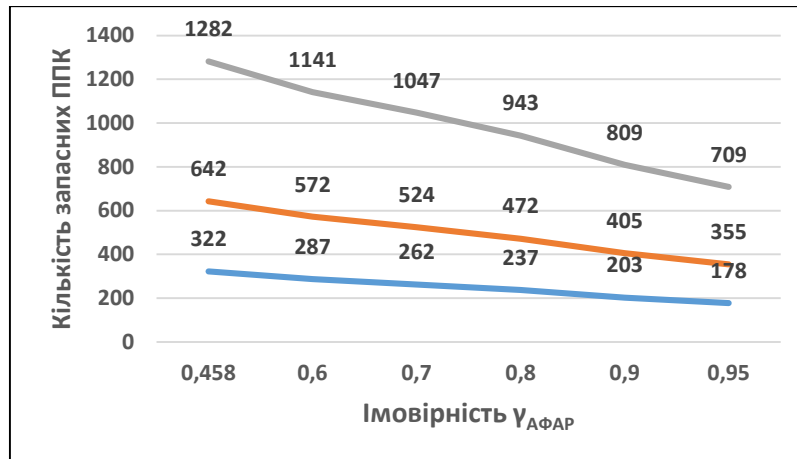


Рис. 4.11 Номограма для визначення графіків необхідної кількості запасних каналів ППК залежно від імовірності - $\gamma_{АФАР}$ для різних значень кількості ППК в АФАР: для $N_0 = 3200$ - графік синього кольору; для $N_0 = 6400$ - графік червоного кольору; для $N_0 = 12800$ - графік фіолетового кольору

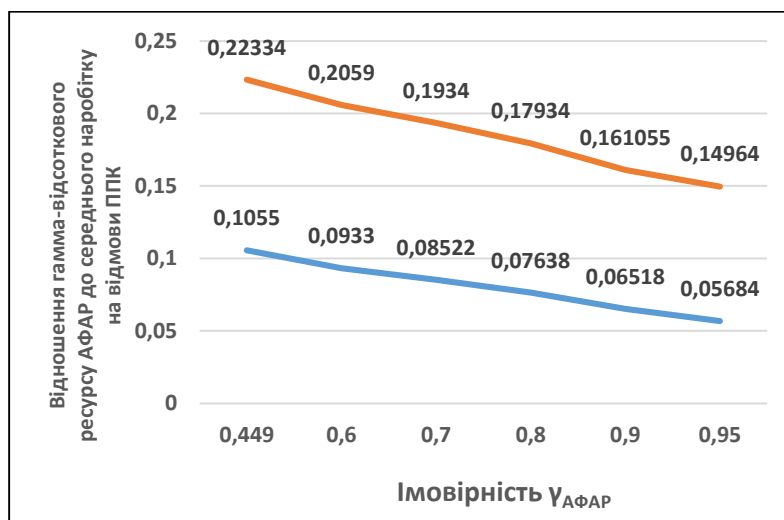


Рис. 4.12 Номограма для визначення графіків залежності відносного гамма-відсоткового ресурсу АФАР - $T_{\gamma_{АФАР}} / T_{0_ППК}$ для експоненціального розподілу відмов ППК в залежності від імовірності - $\gamma_{АФАР}$ (гамма) для різних значень допустимого зниження максимальної дальності РЛС - $\Delta D/D_0$: для $\Delta D/D_0 = 0,10$ - графік синього кольору; для $\Delta D/D_0 = 0,20$ - графік червоного кольору

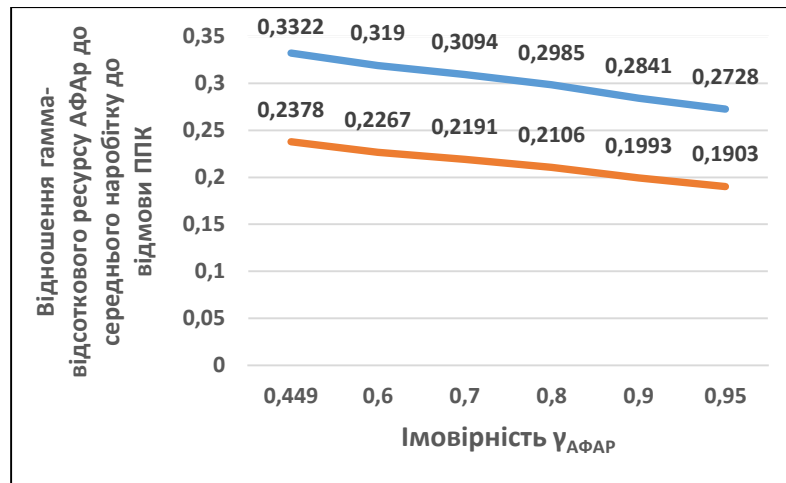


Рис. 4.13 Номограма визначення графіків залежності відносного гамма-відсоткового ресурсу АФАР - $T_{\gamma_{\text{АФАР}}} / T_{0_{\text{ППК}}}$ для дифузійного немонотонного розподілу відмов ППК залежно від імовірності - $\gamma_{\text{АФАР}}$ для різних значень допустимого зниження максимальної дальності РЛС - $\Delta D/D_0$: для $\Delta D/D_0 = 0,10$ - графік синього кольору; для $\Delta D/D_0 = 0,20$ - графік червоного кольору

На рис. 4.14 - 4.16 наведені номограми для визначення графіків залежності відносного гамма-відсоткового ресурсу АФАР для різних значень допустимого зниження максимальної дальності РЛС для визначення кількості запасних каналів і модулів.

У табл. 4.12 представлені результати обчислень необхідної кількості запасних каналів і модулів до капітального ремонту АФАР за різними розподілами відмов ППК.

Приклад 4.3

Необхідно визначити потрібну 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 - $\Delta D/D_0 = 0,10$

Вихідні дані

$N_{0_{\text{ППК}}} = 6400$, $T_{\text{Зад.рес.}_\text{АФАР}} = 20\,000$ год, $T_{0_{\text{ППК}}} = 50\,000$ год, $\gamma_{\text{АФАР}} = 0,80$.

Результати визначення потрібної кількості запасних ППК до капітального ремонту АФАР

Тип розподілу ППК	$T_{\gamma_АФАР}/T_{0_ППК}$	$T_{\gamma_АФАР}$, ГОД	$\varepsilon_{АФАР} = T_{РЕС_РЛС} / T_{\gamma_АФАР}$	$Z_{ППК}(T_{ЗАД_РЕС_РЛС}$
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

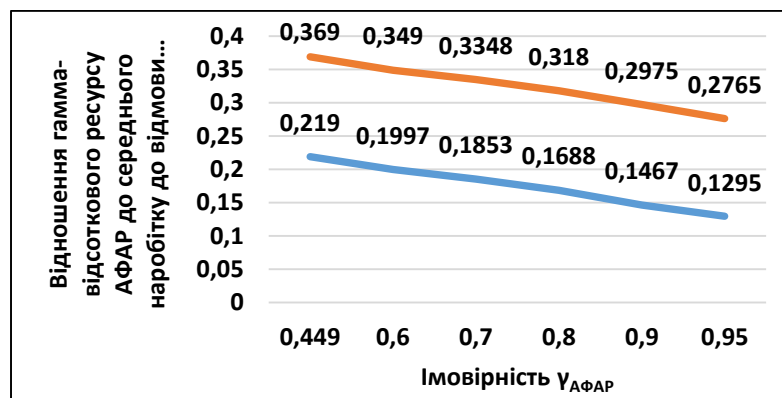


Рис. 4.14 Номограма для визначення графіків залежності відносного гамма-відсоткового ресурсу АФАР - $T_{\gamma_АФАР} / T_{0_ППК}$ для композиції ER/2×DNR/2 відмов ППК залежно від імовірності - $\gamma_{АФАР}$ (гамма) для різних значень допустимого зниження максимальної дальності РЛС - $\Delta D/D_0$: для $\Delta D/D_0 = 0,10$ - графік синього кольору; для $\Delta D/D_0 = 0,20$ - графік червоного кольору

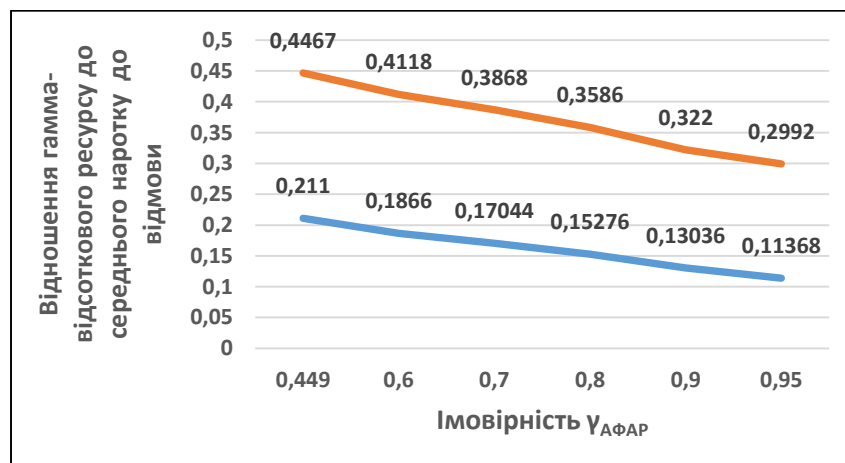


Рис. 4.15 Номограма для визначення графіків залежності відносного гамма-відсоткового ресурсу АФАР - $T_{\gamma_АФАР} / T_{0_ППК}$ для Вейбулла розподілу відмов ППК залежно від імовірності - $\gamma_{АФАР}$ (гамма) для різних значень допустимого зниження максимальної дальності РЛС - $\Delta D/D_0$: для $\Delta D/D_0 = 0,10$ - графік синього кольору; для $\Delta D/D_0 = 0,20$ - графік червоного кольору

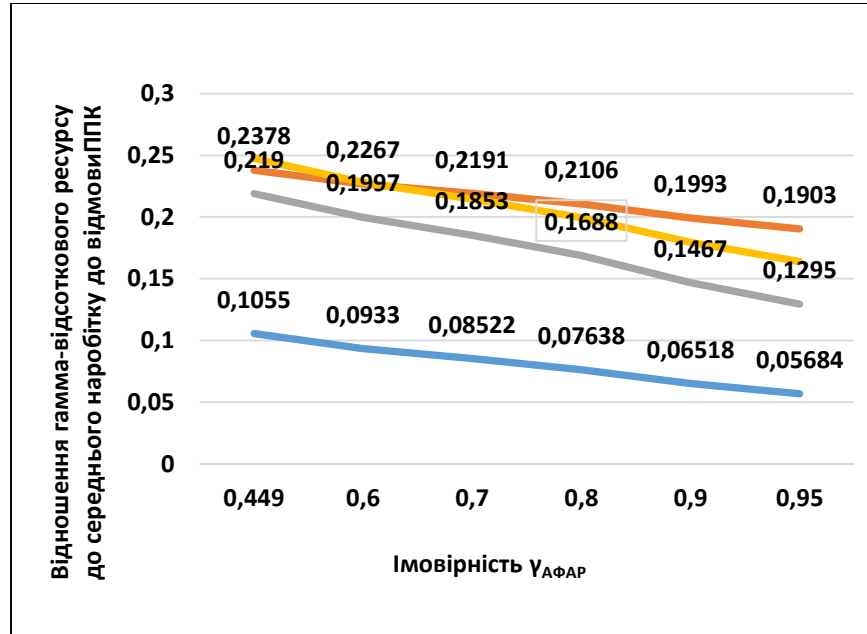


Рис. 4.16 Номограма для визначення графіків залежності відносного гамма-відсоткового ресурсу АФАР - $T_{\gamma_{\text{АФАР}}} / T_{0_{\text{ППК}}}$ за допустимим зниженням максимальної дальності РЛС - $\Delta D/D_0 = 0,10$ для різних розподілів відмов ППК залежно від імовірності - $\gamma_{\text{АФАР}}$ (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. 4.12 найбільшу кількість запасних ППК у складі ЗПП 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.

4.6.5 Практичні рекомендації щодо визначення необхідної кількості запасних модулів антенної решітки на заданий термін служби для різних стратегій експлуатації та ТО АФАР РЛС визначені у табл. 4.13 (наведені значення необхідної кількості запасних ППК АФАР РЛС для реалізації чотирьох стратегій експлуатації та ТО).

Таблиця 4.13

**Значення необхідної кількості запасних ППК АФАР
РЛС для реалізації чотирьох стратегій експлуатації та ТО**

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

4.7. Висновки до четвертого розділу

1. Найбільш перспективною математичною моделлю для апроксимації реальної (статистичної) імовірності безвідмовної роботи ЕРВ при імовірнісному аналізі надійності електронних модулів є композиція експоненціального і дифузійного монотонного розподілів (модель ЕР × ДНР).

2. 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 дозволило збільшити оцінку середнього наробітку до відмови АФАР, яка не потребує постійного обслуговування від 30% до 150%.

3. Доопрацьовано та дістало 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 за матеріалами четвертого розділу

1. 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

2. 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 системи»*. №2, 2014. С. 142-150.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Костановский 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.

РОЗДІЛ 5.
РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАДІЙНОСТІ
АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК
РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ, ЩО ОБСЛУГОВУЮТЬСЯ

5.1 Постановка завдань

У п'ятому розділі в підрозділах 5.2 - 5.4 будуть розроблені математичні моделі надійності АФАР зі однорівневою і дворівневою структурною схемою надійності (ССН), що обслуговуються, . Будуть розроблені номограми і графіки залежності коефіцієнта технічного використання від середнього наробітку до відмови ППК і середнього часу технічного обслуговування АФАР. В підрозділі 5.5 будуть визначені потрібні кількості запасних приймально-передавальних каналів під час проведення технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток.

5.2 Розроблення математичних моделей надійності активних фазованих антенних решіток з однорівневою структурною схемою надійності, що обслуговуються

Основним показником надійності обслуговуваних АФАР з однорівневою ССН є коефіцієнт технічного використання (КТВ):

$$K_{ТВ_АФАР} = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [K_{ТВ_ППК} K_{ТВ_МВЖ}]^{G_0-i} [1 - K_{ТВ_ППК} K_{ТВ_МВЖ}]^i \quad (5.1)$$

$$\text{де: } K_{ТВ_ППК} = \frac{T_{0_ППК}}{T_{0_ППК} + \tau_{ТО}}, \quad K_{ТВ_МВЖ} = \frac{T_{0_МВЖ}}{T_{0_МВЖ} + \tau_{ТО}} \quad (5.2)$$

відповідно, коефіцієнти технічного використання ППК та МВЖ.

m_G - допустима кількість відмов ППК у антенній підрешітці (АФАР з однорівневою ССН);

G_0 – загальна кількість ППК у підрешітці (АФАР з однорівневою ССН).

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

$$K_{ТВ\text{однорівн},\text{АФАР}} \approx \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [K_{ТВ\text{ППК}}]^{G_0-i} [1 - K_{ТВ\text{ППК}}]^i \quad (5.3)$$

На рис. 5.1 – 5.4 представлені графіки залежності коефіцієнта технічного використання АФАР з однорівневою ССН (з 100 ППК) в залежності від середнього часу технічного обслуговування ППК для різних значень середнього наробітку на відмову ППК.

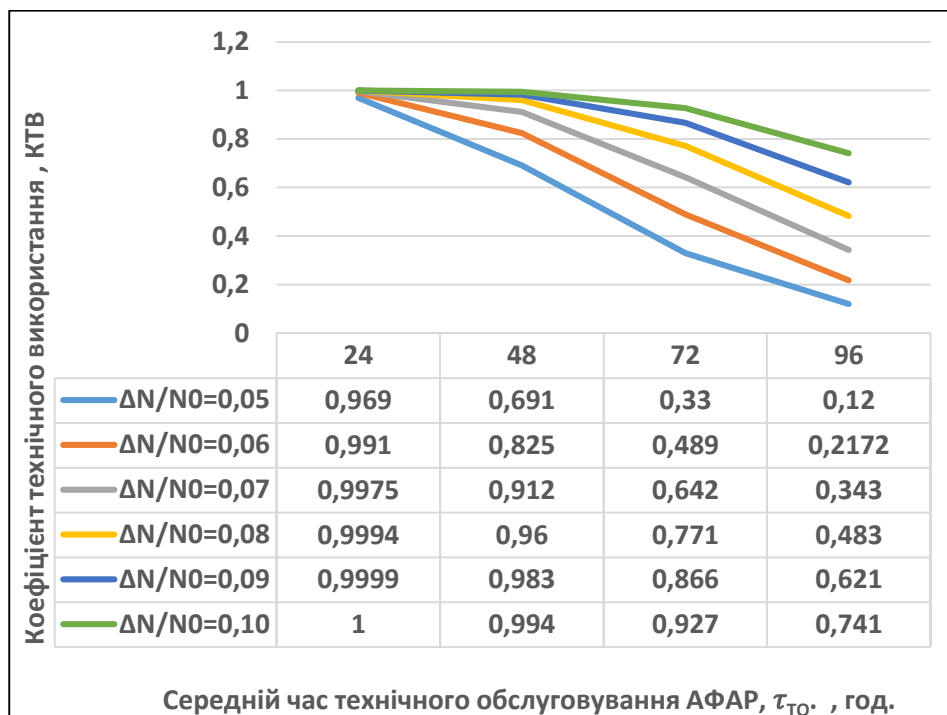


Рис. 5.1 Графіки залежності КТВ АФАР з однорівневої ССН (на 100 ППК) від середнього часу ТО при $T_{0_ППК} = 1000$ год.

На рис. 5.5 – 5.8 представлені графіки залежності КТВ АФАР з дворівневою ССН (з 6400 ППК) в залежності від середнього часу технічного обслуговування ППК для різних значень середнього наробітку на відмову ППК.

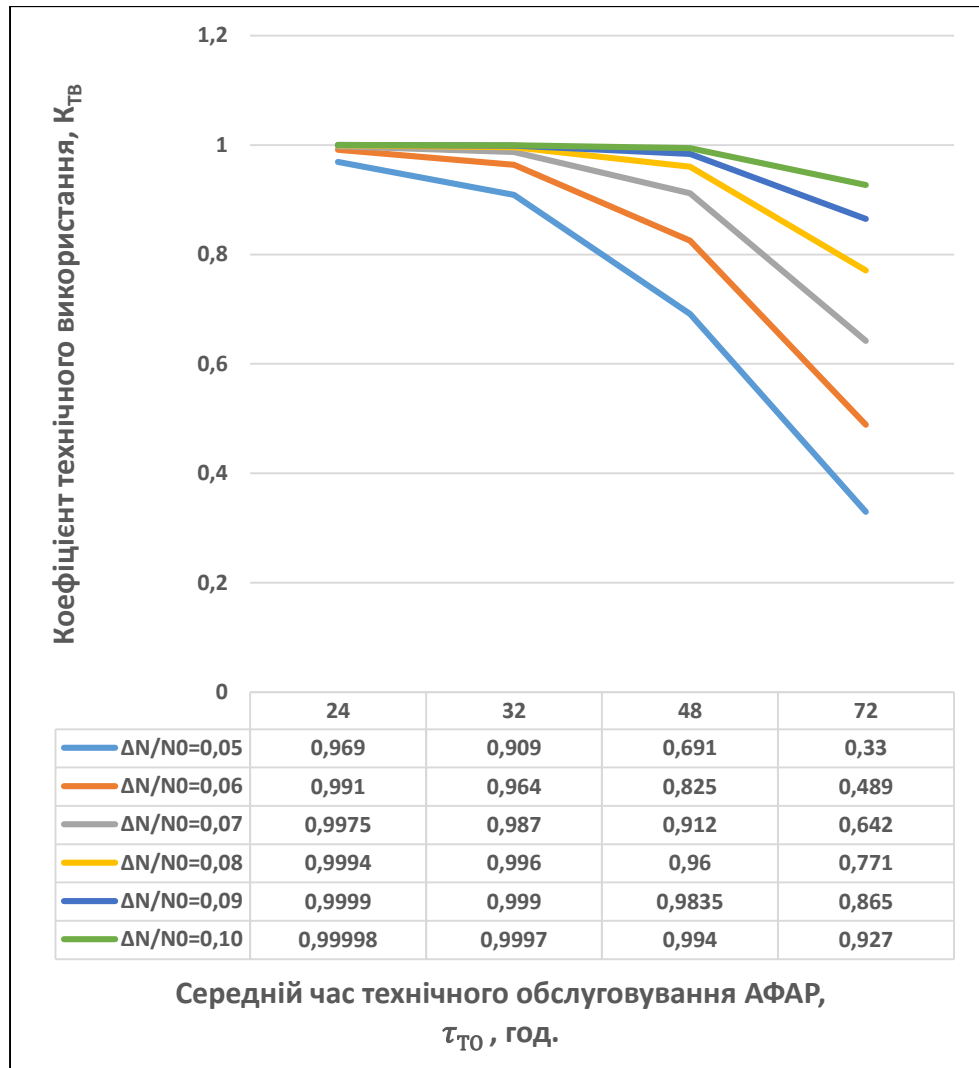


Рис. 5.2 Графіки залежності коефіцієнта технічного використання АФАР з однорівневою ССН (на 100 ППК) від середнього часу технічного обслуговування при $T_{0_ППК} = 2000$ год.

Графіки на рис. 5.1- 5.4 дозволяють визначити потрібний час проведення технічного обслуговування ППК які відмовили, та спланувати роботи з

технічного обслуговування АФАР з однорівневою ССН для забезпечення необхідного значення коефіцієнта технічного обслуговування.

Приклад 5.1 . Потрібно забезпечити значення коефіцієнта технічного обслуговування $K_{ТВ} = 0,990$ для АФАР з однорівневою ССН з 100 ППК. Середній наробіток на відмову ППК складає $T_{0_ППК} = 5000$ год. Відносна допустима кількість відмов ППК складає $\Delta N / N_0 = 0,06$.

Рішення прикладу 1.

На рис. 3 для $\Delta N / N_0 = 0,05$ знаходимо потрібне значення середнього часу технічного обслуговування АФАР – $\tau_{ТО} = 120$ год.

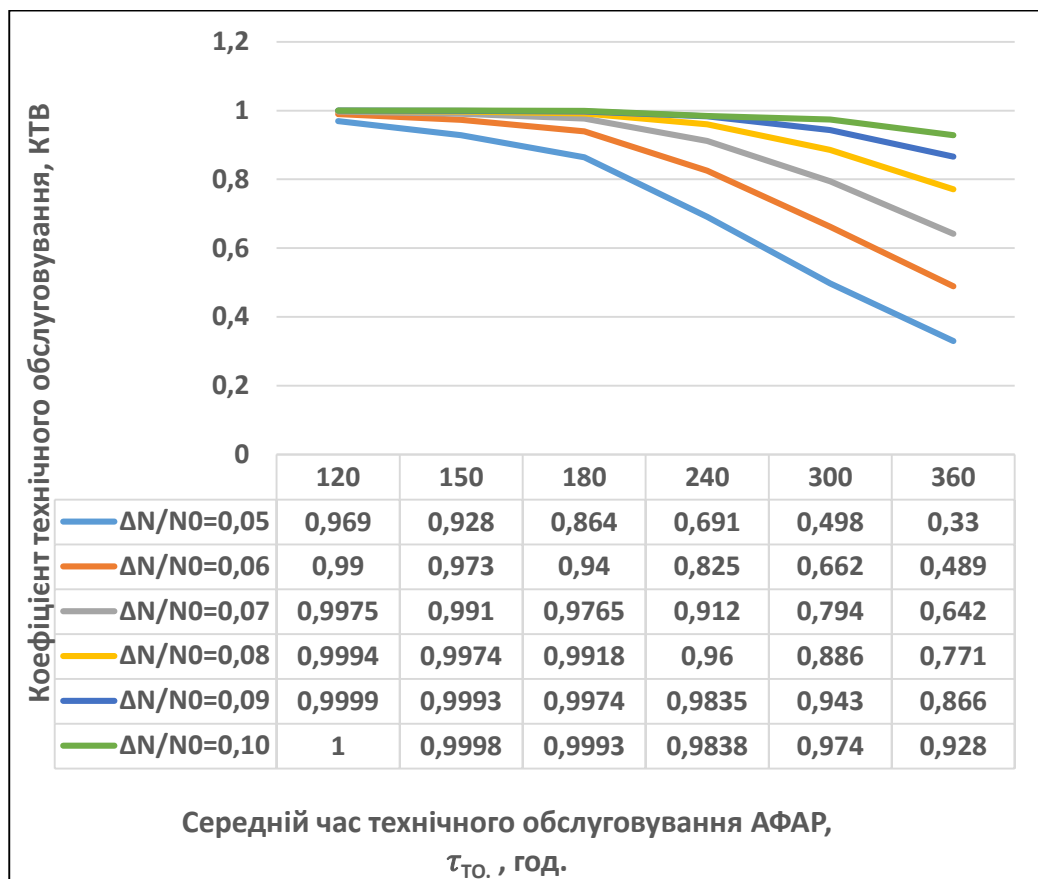


Рис. 5.3 Графіки залежності коефіцієнта технічного використання АФАР з однорівневою ССН (на 100 ППК) від середнього часу технічного обслуговування при $T_{0_ППК} = 5000$ год.

5.3. Розроблення математичних моделей надійності активних фазованих антенних решіток з дворівневою структурною схемою надійності, що обслуговуються

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

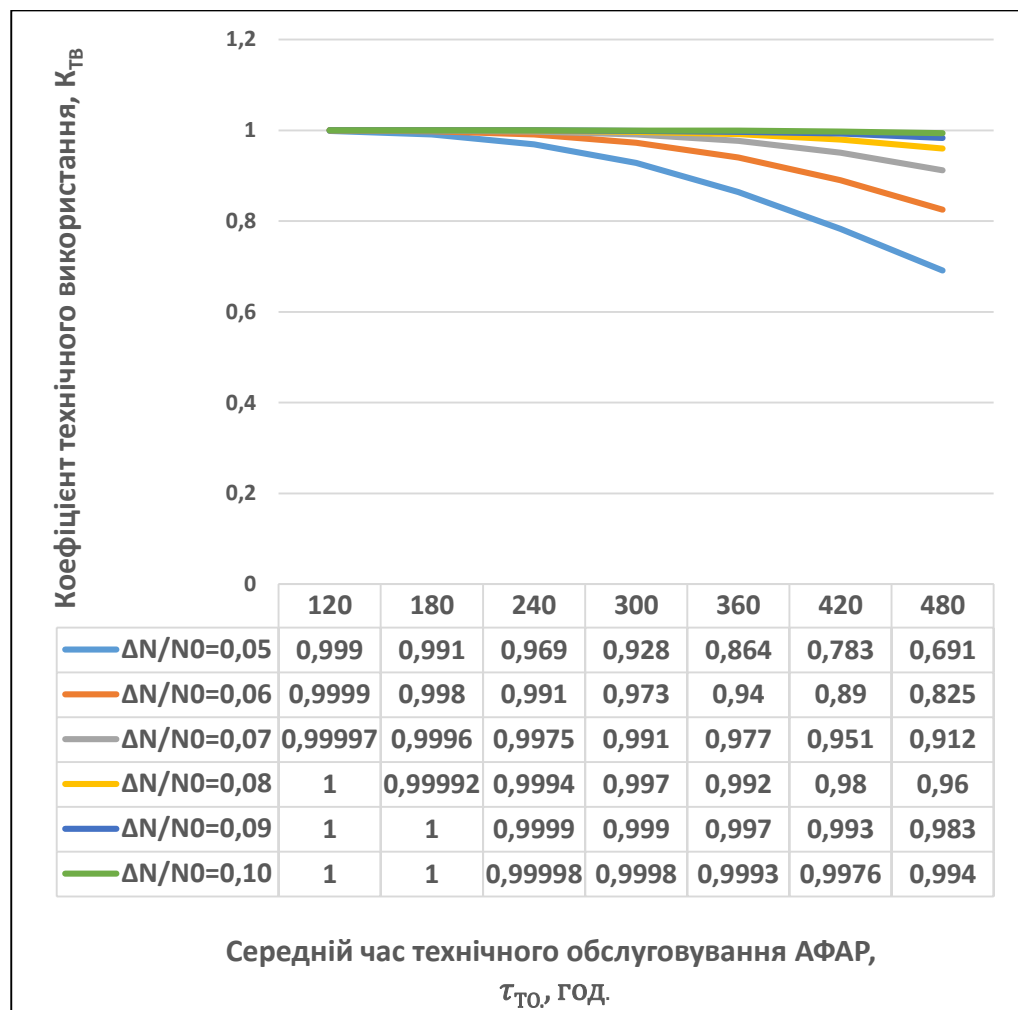


Рис.5.4 Графіки залежності коефіцієнта технічного використання АФАР з однорівневою ССН (на 100 ППК) від середнього часу технічного обслуговування при $T_{0_ППК} = 10\ 000$ год.

$$K_{ТВ_{\text{дворівн. АФАР}}} \approx \sum_{i=0}^{m_S} C_{S_0}^i [K_{ТВ_{\text{ПДР}}}]^{S_0-i} [1 - K_{ТВ_{\text{ПДР}}}]^i, \quad (5.4)$$

де:

$$K_{ТВ\text{ПДР}} = \frac{T_{0\text{ПДР}}}{T_{0\text{ПДР}} + \tau_{ТО}} \quad (5.5)$$

$$T_{0\text{ПДР}} = -T_{0\text{ППК}} \times \frac{\ln\left(1 - \frac{\Delta G}{G_0} - \frac{1}{G_0}\right)}{\left(1 + \frac{1}{T_{0\text{ППК}}} + \frac{1}{T_{0\text{ППМП}}} + \frac{2}{T_{0\text{МВЖ}}}\right)} \quad (5.6)$$

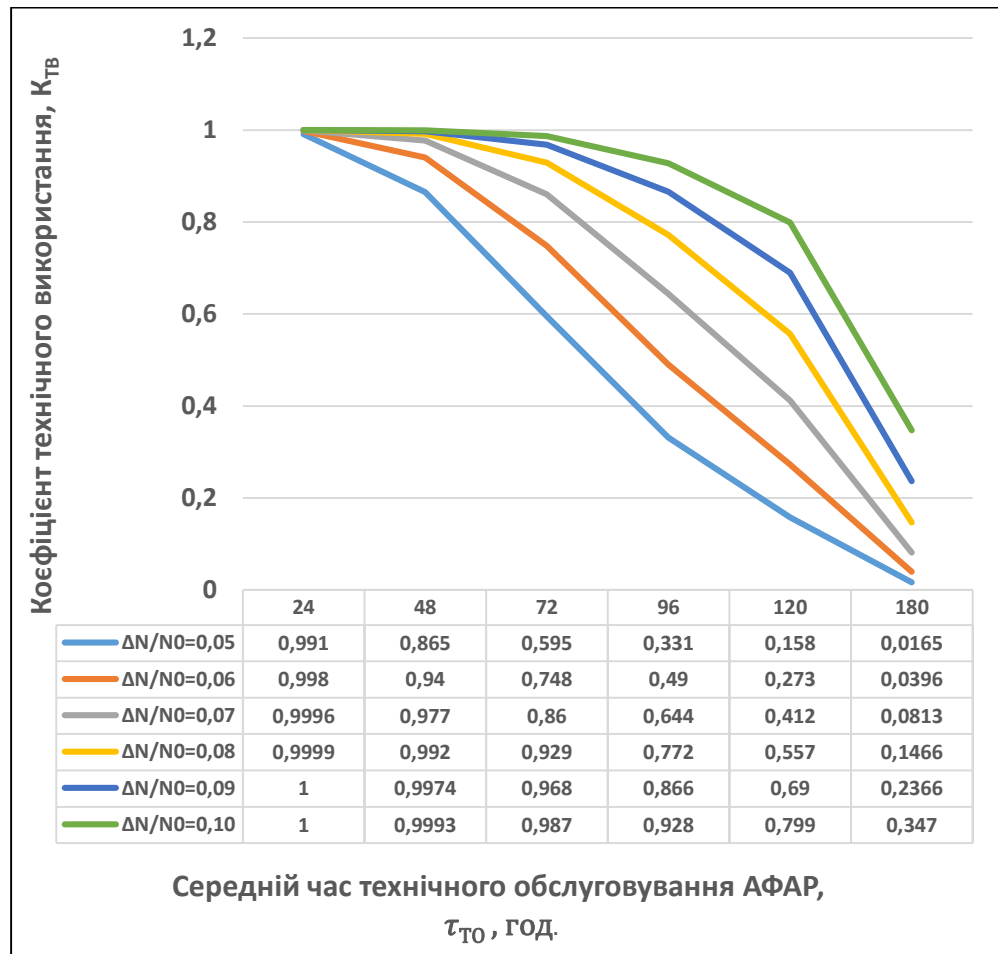


Рис. 5.5. Графіки залежності КТВ АФАР з дворівневою ССН (на 6400 ППК) від середнього часу технічного обслуговування при $T_{0\text{ППК}} = 10\,000$ год. і $T_{0\text{ПДР}} = 1333$ год.

Графіки на рис. 5.5 – 5.8 дозволяють визначати потрібний час проведення технічного обслуговування ППК які відмовили, та спланувати роботи з ТО АФАР з дворівневої ССН для забезпечення необхідного значення коефіцієнта технічного обслуговування.

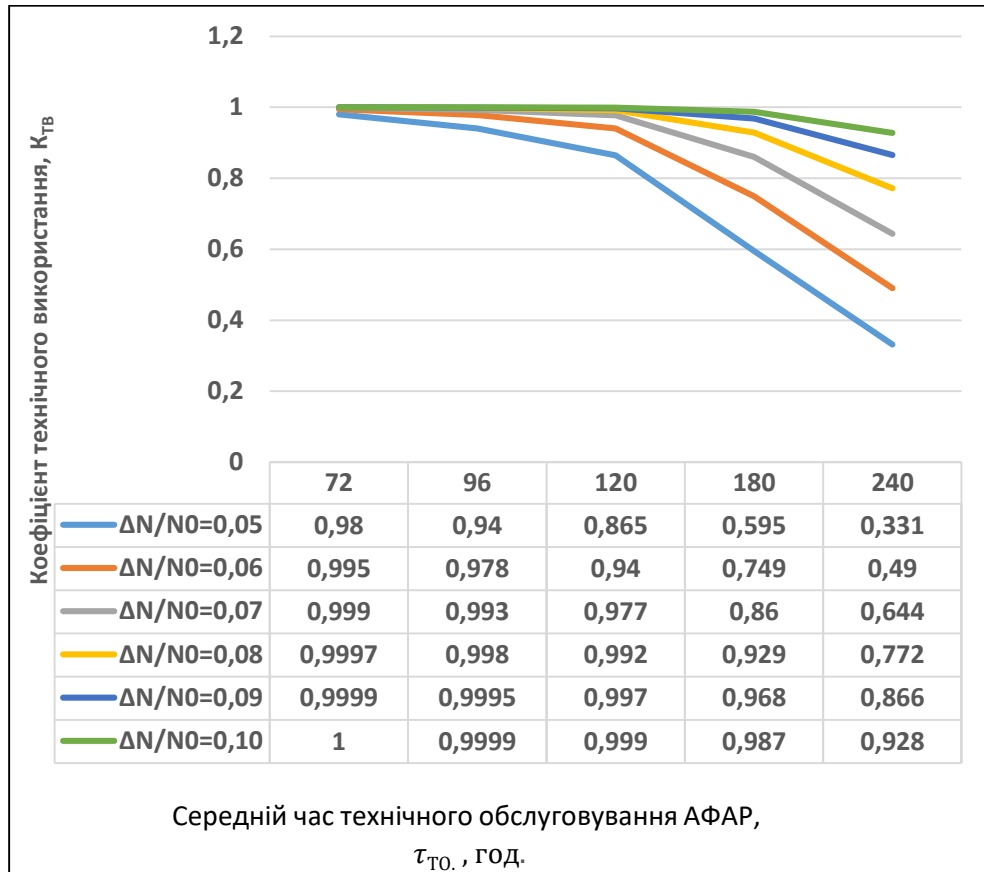


Рис. 5.6. Графіки залежності коефіцієнта технічного використання АФАР з дворівневою ССН (на 6400 ППК) від середнього часу технічного обслуговування при $T_{0_ППК} = 25\ 000$ год. і $T_{0_ПДР} = 3338$ год.

Приклад 5.2. Потрібно забезпечити значення коефіцієнта технічного використання $K_{ТВ} = 0,990$ для АФАР з дворівневою ССН з 6400 ППК. Середній наробіток на відмову ППК складає $T_{0_ППК} = 25\ 000$ год. Відносна допустима кількість відмов ППК складає $\Delta N / N_0 = 0,10$.

Рішення прикладу 5.2.

На рис. 5.6 для $\Delta N/N_0 = 0,10$ знаходимо потрібне значення середнього часу технічного обслуговування АФАР – $\tau_{ТО} = 180$ год.

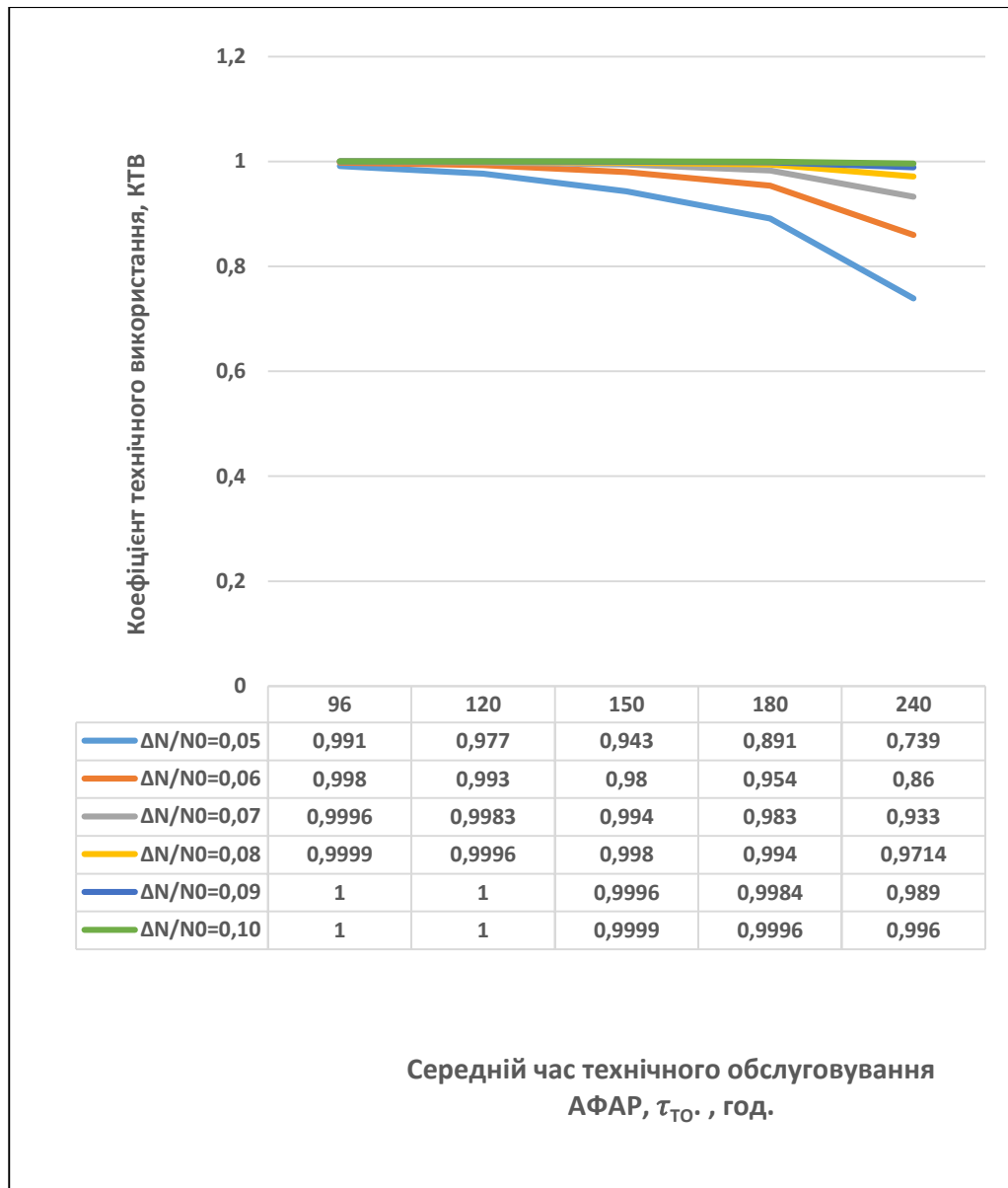


Рис. 5.7 Графіки залежності коефіцієнта технічного використання АФАР з дворівневою ССН (на 6400 ППК) від середнього часу технічного обслуговування при $T_{0_ППК} = 40\ 000$ год. і $T_{0_ПДР} = 5341$ год.

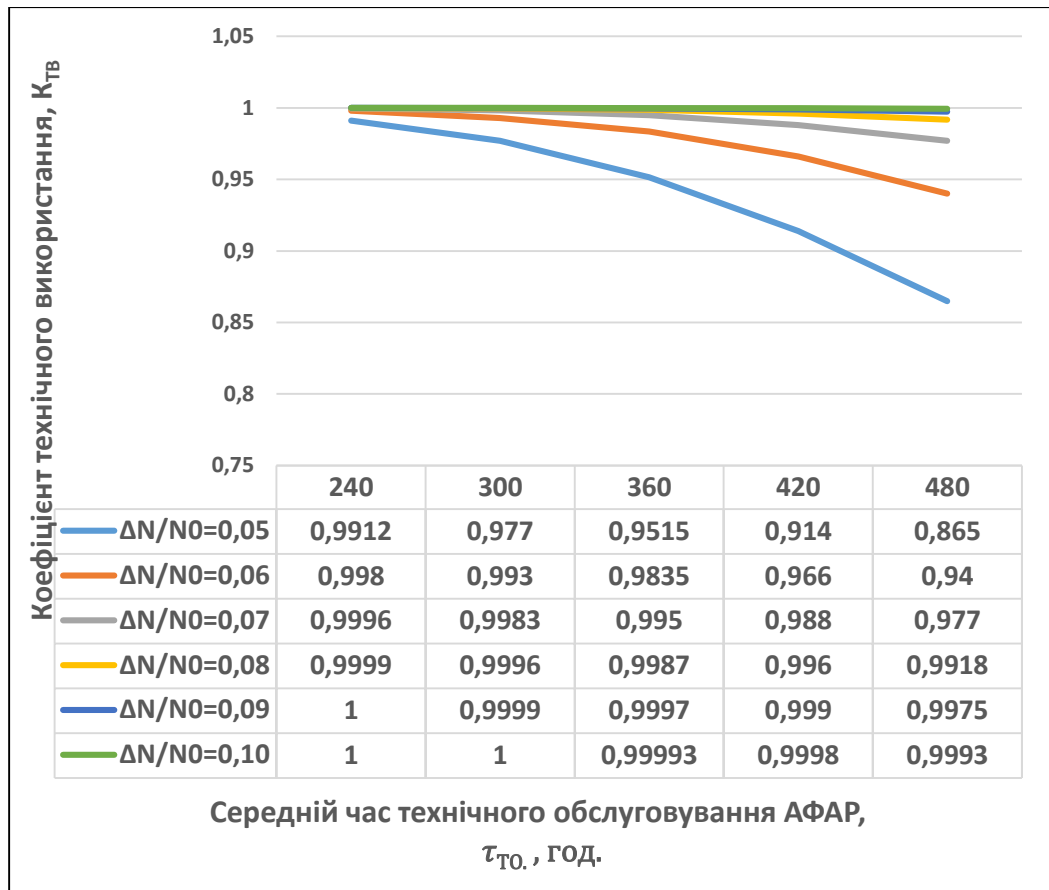


Рис. 5.8. Графіки залежності коефіцієнта технічного використання АФАР з дворівневою ССН (на 6400 ППК) від середнього часу технічного обслуговування при $T_{0_ППК} = 100\ 000$ год. і $T_{0_ПДР} = 13\ 352$ год.

На рис. 5.9 представлена номограма залежності коефіцієнта технічного використання АФАР в залежності від нормованого середнього часу технічного обслуговування - $\tau_{норм.ТО}$.

$$K_{ТВ_ППК} = \frac{T_{0_ППК}}{T_{0_ППК} + \tau_{ТО}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_{ТО}}{T_{0_ППК}}} = \frac{1}{1 + \tau_{норм.ТО}} \quad (5.7)$$

де: $\tau_{норм.ТО} = \frac{\tau_{ТО}}{T_{0_ППК}}$ - нормований середній час технічного обслуговування АФАР.

Використання номограми на рис. 5.9 дозволяє визначати середній час технічного обслуговування за формулами (5.1 – 5.3) для АФАР з однорівневою АФАР і за формулами (5.4-5.6) для АФАР з дворівневою АФАР.

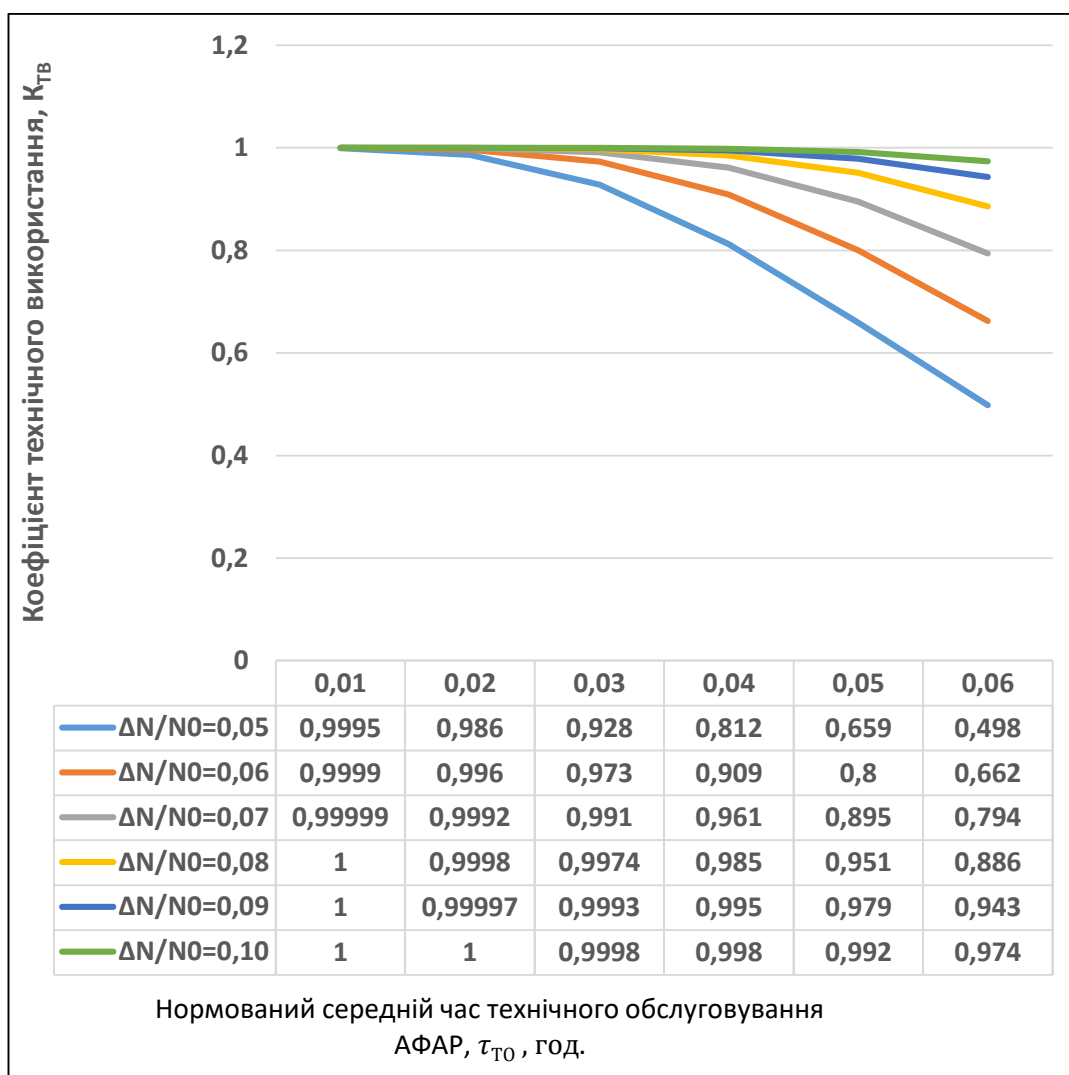


Рис. 5.9. Номограма залежності коефіцієнта технічного використання в залежності від нормованого середнього часу технічного обслуговування для АФАР

Приклад 5.3. Потрібно забезпечити значення коефіцієнта технічного використання $K_{ТВ} = 0,992$ для АФАР з дворівневою ССН з 6400 ППК. Середній наробіток на відмову ППК складає $T_{0_ППК} = 100\ 000$ год.

Відносна допустима кількість відмов ППК складає $\Delta N / N_0 = 0,10$.

Рішення прикладу 5.3.

На рис. 3 для $\Delta N / N_0 = 0,10$ знаходимо потрібне значення нормованого середнього часу технічного обслуговування АФАР – $\tau_{норм.проф.} = 0,05$.

Тоді середній час технічного обслуговування

$$\tau_{проф} = \tau_{норм.проф.} \times T_{0_ППК} = 0,05 \times 100000 = 5000 \text{ год.}$$

5.4 Визначення вимог до середнього часу технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток для забезпечення потрібного значення коефіцієнта технічного використання

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 транцендентних рівнень:

- для АФАР з однорівневою ССН:

$$K_{ТВ_АФАР_ВИМ}(\tau_{ТО}) = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [K_{ТВ_ППК}(\tau_{ТО_ВИМ})K_{ТВ_МВЖ}(\tau_{ТО_ВИМ})]^{G_0-i} [1 - K_{ТВ_ППК}(\tau_{ТО_ВИМ})K_{ТВ_МВЖ}(\tau_{ТО_ВИМ})]^i \quad (5.8)$$

- для АФАР з дворівневою ССН:

$$K_{ТВ_ДВ_АФАР_ВИМ} = \sum_{i=0}^{m_S} C_{S_0}^i [K_{ТВ_ПДР}(\tau_{ТО_ВИМ})]^{S_0-i} [1 - K_{ТВ_ПДР}(\tau_{ТО_ВИМ})]^i \quad , \quad (5.9)$$

5.5 Визначення потрібної кількості запасних приймально-передавальних каналів під час проведення технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток

Формула для визначення необхідної кількості запасних приймально-передавальних каналів (ППК) для проведення технічного обслуговування АФАР:

$$Z_{\text{ППК}}(\tau_{\text{проф.}}) = N_{0_ППК} [1 - P_{\text{ППК}}(\tau_{\text{проф.}})], \quad (5.10)$$

У табл. 5.1 і 5.2 представлені кількість запасних приймально-передавальних каналів (ППК) для проведення технічного обслуговування АФАР:

Таблиця 5.1

**Кількість запасних приймально-передавальних каналів (ППК) для
проведення технічного обслуговування АФАР з однорівневою АФАР**

Середній час технічного обслуговування	Середній наробіток до відмови ППК, год			
	1000	2000	5000	10000
24	2,37	1,19	0,48	0,24
32	3,15	1,59	0,64	0,32
48	4,69	2,37	0,96	0,48
72	6,95	3,54	1,43	0,72
96	9,15	4,69	1,90	0,96
120	11,31	5,82	2,37	1,19
150	13,92	7,23	2,96	1,49
180	16,47	8,61	3,54	1,78
240	21,34	11,31	4,69	2,37
300	25,92	13,93	5,82	2,96
360	30,23	16,47	6,95	3,54

Таблиця 5.2

Кількість запасних приймально-передавальних каналів (ППК) для проведення технічного обслуговування АФАР з однорівневою АФАР

Середній час технічного обслуговування	Середній наробіток до відмови ППК, год			
	10000	25000	40000	100000
24	15,34	6,14	3,84	1,54
48	30,65	12,3	7,68	3,07
72	45,91	18,40	11,51	4,60
96	61,15	24,53	15,34	6,14
120	76,3	30,65	19,17	7,68
150	95,3	38,3	23,96	9,59
180	114,2	45,91	28,73	11,51
240	151,8	61,15	38,30	15,34
300	189,2	76,3	47,8	19,17
360	226,3	91,5	57,3	23,0
420	263,2	106,6	66,9	26,8
480	300	121,7	76,3	30,7

5.6 Висновки до п'ятого розділу

1. Використання розроблених номограм дозволяє визначати потрібну кількість запасних ППК, які відмовили, та спланувати роботи по ТО АФАР з дворівневою ССН для забезпечення необхідного значення коефіцієнта технічного використання.

2. Визначення часу проведення ТО ППК дозволяє спрогнозувати потрібну кількість запасних моделей для виконання ТО АФАР.

3. Розроблені математичні моделі АФАР, що обслуговуються можуть дозволити персоналу великих РЛС збудувати ефективні плани технічного

обслуговування АФАР для забезпечення необхідного коефіцієнта технічного використання.

Список публікацій здобувача за матеріалами п'ятого розділу

1. 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/ATM»*. Державне космічне агентство України, Укр. Аеро. Рух., НАУ, Інститут аеронавігації. С. 63.

2. 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.

3. 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*.

4. 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.

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

6. 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).

7. Пояснювальна записка до технічного проекту 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

РОЗДІЛ 6.

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, СТРАТЕГІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ І ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА НАРОБІТКОМ ТА ФАКТИЧНИМ СТАНОМ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

6.1 Постановка завдань

У розділі 6 будуть розглянуто розроблення та дослідження математичних моделей оптимального ТО (підрозділи 6.2, 6.3) і розроблення та дослідження методів реалізації стратегій експлуатації і ТО АФАР РЛС (підрозділ 6.4).

6.2 Розроблення та дослідження математичних моделей оптимізації технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій

6.2.1. Загальні положення

Аналіз робіт з оцінки показників надійності та технічної експлуатації АФАР РЛС показав, що в даний час є актуальною проблема побудови моделей оптимального технічного обслуговування (ТО) однорівневих і дворівневих АФАР при забезпеченні гарантійного обслуговування РЛС.

Передбачається, що ТО передавальної АФАР РЛС проводиться з періодичністю, при якій передбачається повна заміна усіх ППК АФАР, що відмовили. Після ТО інтенсивність відмов антенної решітки падає до нуля. Періодичність ТО не залежить від числа відмов, які сталися в перерві між профілактиками, а аварійний ремонт (АР) не впливає на інтенсивність відмов

АФАР. При оптимізації ТО використовуються або технічна характеристика ефективності, коефіцієнт технічного використання (КТВ) – $K_{ТВ}(\tau)$, або, відповідна йому, економічна характеристика ефективності, питомі експлуатаційні витрати (ПЕВ) – $C(\tau)$. Оптимізація ТО проводиться за критерієм максимуму КТВ – $K_{ТВ}(\tau)$ (пряма задача) або за критерієм мінімуму математичного очікування ПЕВ – $C(\tau)$ (зворотна задача) [103, 105].

6.2.2 Розроблення та дослідження математичної моделі оптимізації технічного обслуговування активної фазованої антенної решітки з однорівневою структурною схемою надійності

Мета розробки

1. Розроблення математичної моделі оптимального ТО розподілених однорівневих АФАР і визначення основних техніко-економічних характеристик і критеріїв оптимізації ТО.
2. Визначення і дослідження техніко-економічних характеристик і вигод від оптимізації ТО для двох типових розподілених структур АФАР.
3. Обґрунтування математичної моделі оптимізації ТО розподільних структур АФАР.

Позначимо τ – періодичність ТО АФАР; τ_n і c_n відповідно тривалість та вартість проведення ТО АФАР; τ_p і c_p – відповідно, тривалість та вартість збитку під час АФАР; $P_{АФАР}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи (ІБР) АФАР.

Тоді аналітичний вираз для КТВ однотипних АФАР має вигляд:

$$K_{ТВ}(\tau) = \frac{\tau}{\tau + \tau_n - \tau_p \ln P_{АФАР}(\tau)} \quad (6.1)$$

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

$$M[C(\tau)] = \frac{c_{\pi} - c_p \ln P_{\text{АФАР}}(\tau)}{\tau}, \quad (6.2)$$

де

$$\tau_{\pi} = \tau_{\pi 1} \{1 + N[1 - P_{\text{ППК}}(\tau)]\}, \quad (6.3)$$

$$c_{\pi} = c_{\pi 1} \{1 + N[1 - P_{\text{ППК}}(\tau)]\}, \quad (6.4)$$

тут $\tau_{\pi 1}$, $c_{\pi 1}$ – відповідно тривалість та вартість ТО одного ППК розподільної структури АФАР, N – кількість ППК розподільної структури АФАР. Оптимальна періодичність $\tau_{\text{орт}}$ у прямій та зворотній задачах оптимізації ТО АФАР визначаються за узагальненим трансцендентним рівнянням:

$$\theta(\tau) = \varepsilon, \quad \text{де } \theta(\tau) = \frac{\ln[P_{\text{ФАР}}(\tau)] + \tau L_{\text{ФАР}}(\tau)}{N[1 - P_{\text{к}}(\tau) - \tau f_{\text{к}}(\tau)]}, \quad (6.6)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\tau_{\pi 1}}{\tau_p} - \text{під час оптимізації за критерієм max КТВ} \\ \frac{c_{\pi 1}}{c_p} - \text{під час оптимізації за критерієм min м.о. ПЕВ} \end{cases}$$

де $L_{\text{АФАР}}(\tau)$ – інтенсивність відмов АФАР,

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

За експоненціальним розподілом формули для імовірності безвідмовної роботи і щільності розподілу відмов ППК розподільної структури АФАР:

$$P_{\text{ППК}}(\tau) = \exp(-\lambda_{\text{ППК}}\tau), \quad f_{\text{ППК}}(\tau) = \lambda_{\text{ППК}} \exp(-\lambda_{\text{ППК}}\tau), \quad (6.7)$$

Аналітичний вираз для імовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов АФАР має вигляд:

$$P_{\text{АФАР}}(\tau) = \sum_{j=0}^m C_N^j [P_{\text{ППК}}(\tau)]^{N-j} [1 - P_{\text{ППК}}(\tau)]^j, \quad (6.8)$$

$$\Lambda_{\text{АФАР}}(\tau) = \frac{n\lambda_{\text{ППК}} C_N^m [1 - P_{\text{ППК}}(\tau)]^m [P_{\text{ППК}}(\tau)]^n}{P_{\text{АФАР}}(\tau)} \quad (6.9)$$

Ефективність оптимізації ТО АФАР оцінюється виграшами від оптимізації:

– виграш за КТВ:

$$W[K_{\text{ТИ}}(\tau_{\text{опт}})] = \left\{ 1 - \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} K_{\text{ТИ}}(\tau)}{K_{\text{ТИ}}(\tau_{\text{опт}})} \right\} \times 100\% \quad (6.10)$$

– виграш за м.о. ПЕВ:

$$W\{M[C(\tau_{\text{опт}})]\} = \left\{ 1 - \frac{M[C(\tau_{\text{опт}})]}{\lim_{n \rightarrow \infty} M[C(\tau)]} \right\} \times 100\% \quad (6.11)$$

Приклад 6.1

Дослідження моделі оптимізації ТО двох типів структур АФАР

На рис. 6.1 представлена номограма для визначення оптимальної періодичності ТО двох типових розподільчих структур АФАР.

- 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 - $m_G = 25$.

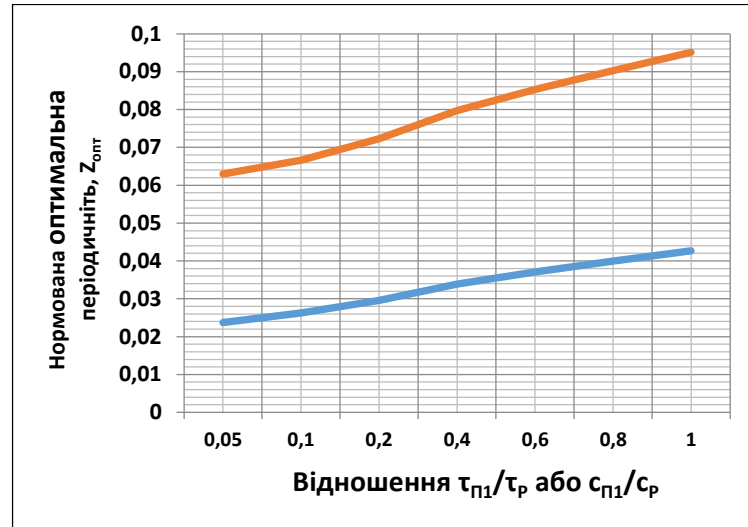


Рис. 6.1 Номограма для визначення нормованої оптимальної періодичності ТО АФАР - $Z_{опт} = \frac{\tau_{опт}}{T_{о.ппк}}$ в залежності від відношення $\frac{\tau_{п1}}{\tau_p}$ ($\frac{c_{п1}}{c_p}$) (синя лінія – 1-ша структура АФАР, червона лінія – 2-га структура АФАР).

На рис 6.2 представлена залежність КТВ - $K_{ТВ}(Z)$ від нормованої періодичності технічного обслуговування $Z = \frac{\tau}{T_{ок}}$ для двох типів структур АФАР.

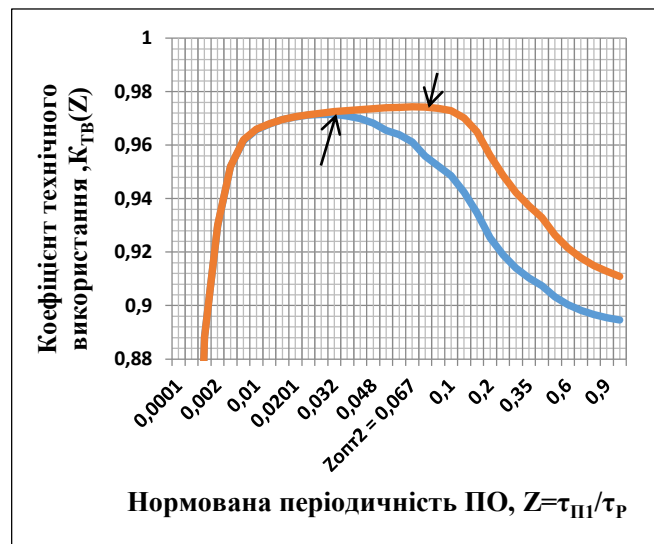


Рис. 6.2 Залежність КТВ - $K_{ТВ}(z)$ за $\tau_{п1}/\tau_p = 0,015$, $\lambda_{ппк} = 100 \times 10^{-6} 1/год$, $\tau_p = 10 год$ (синя лінія – 1-ша структура АФАР, червона лінія – 2-а структура АФАР).

Стрілками позначене оптимальне значення КТВ. Як видно з рис. 6.2 графік залежності КТВ характеризується плоскою вершиною, що дозволяє проводити

ТО АФАР не тільки в оптимальні строки, але і близькі до оптимальних (квазі оптимальні строки). Зі збільшенням кількості резервних каналів в розподільній структурі АФАР (типова структура 2, $m_G=25$) ширина вершини КТВ розширюється вдвоє, тобто діапазон значень квазі оптимальних періодичностей збільшується вдвоє (порівняно із типовою структурою 1, $m_G=12$). Максимальне значення КТВ для другої типової структури ФАР незначно вище максимального значення для першої структури АФАР.

На рис. 6.3 представлена залежність КТВ АФАР від нормованої періодичності ПО - $Z = \frac{\tau}{T_{ок}}$ за різними значеннями відношення $\frac{\tau_{п1}}{\tau_p}$.

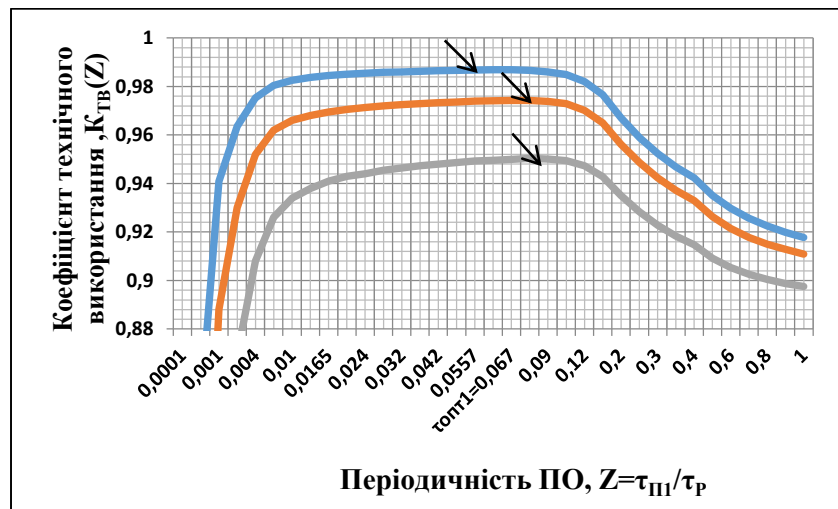


Рис. 6.3 Залежність $K_{ТВ}(Z)$ за різними значеннями відношення $\frac{\tau_{п1}}{\tau_p}$ ($\tau_{п1} = 1$ год – синя лінія, $\tau_{п1} = 2$ год – червона лінія, $\tau_{п1} = 4$ год – зелена лінія; 2-а структура ФАР; $\lambda_{ППК} = 100 \times 10^{-6}$ 1/год, $\tau_p = 10$ год); стрілками позначене максимальне значення КТВ.

Як видно із рис. 6.3 зі збільшенням відношення $\tau_{п1}/\tau_p$, максимальне значення КТВ зменшується, а значення оптимальної періодичності ТО АФАР збільшується.

На рис. 6.4 представлена залежність м.о. ПЕВ від нормованої періодичності ТО - $Z = \frac{\tau}{T_{о_ППК}}$ для двох типів розподільних структур АФАР.

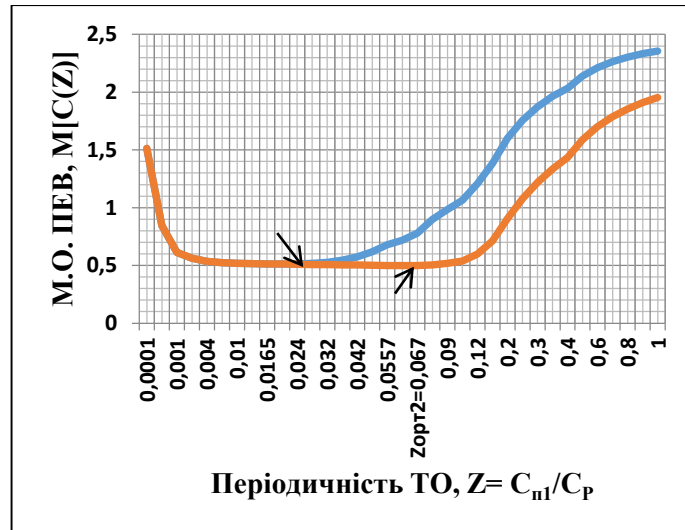


Рис. 6.4 Залежність м. о. ПЕВ - $M[C(Z)]$ за $c_{п1} = 1,5$ у.о., $\lambda_{пк} = 100 \times 10^{-6}$ 1/год, $c_p = 100$ у.о. (синя лінія – 1-ша структура АФАР, червона лінія – 2-га структура АФАР), стрілками позначене мінімальне значення м.о ПЕВ

Як видно з рис. 6.4 графік залежності для м. о. ПЕВ має широку чашоподібну форму, що дозволяє проводити ТО АФАР не тільки у оптимальні строки, але і в строки, близькі до оптимальних (квазі оптимальні строки). Мінімальні значення м.о. ПЕВ для обох типових структур АФАР практично співпадають.

На рис. 6.5 представлена залежність м.о. ПЕВ від нормованої періодичності ТО - $Z = \frac{\tau}{T_{0_пк}}$ за різними значеннями відношення $\frac{c_{п1}}{c_p}$

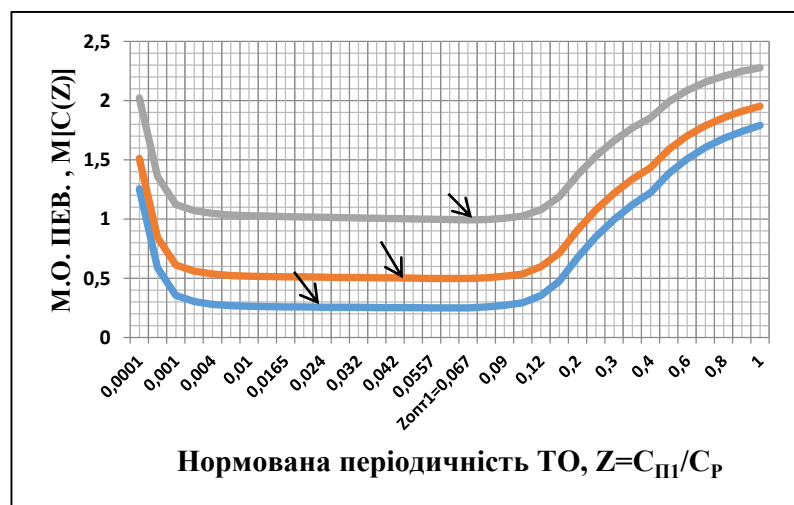


Рис 6.5 Залежність м.о. ПЕВ - $M[C(Z)]$ за $\lambda_{пк} = 100 \times 10^{-6}$ 1/год, 2-а структура АФАР ($N=256, m=25$), $c_{п1} = 100$ у.о. (синя лінія - $c_{п1} = 10$ у.о., червона лінія - $c_{п1} = 20$ у.о., зелена лінія - $c_{п1} = 40$ у.о.), стрілками позначене мінімальне значення м.о ПЕВ

Як видно з рис. 6.6 зі збільшенням відношення $c_{п1}/c_p$ мінімальні значення м.о. ПЕВ і значення оптимальних періодичностей ТО АФАР збільшуються.

Таблиця 6.1

Виграш від оптимізації КТВ - $W[K_{ТВ}(\tau_{опт})]$ для двох структур АФАР за різними значеннями $\tau_{п1}/\tau_p$ (формула 6.14)

$\tau_{п1}/\tau_p$ Номер структури АФАР	$\tau_{п1}/\tau_p = 0,015$ ($\tau_p = 10$ год)	$\tau_{п1}/\tau_p = 0,1$ ($\tau_p = 10$ год)
1 - а структура ($N=256, m_G=12, \lambda_{ППК}=100 \times 10^{-6}$ 1/год)	16,7 %	15,6 %
2 - а структура ($N=256, m_G=25, \lambda_{ППК}=100 \times 10^{-6}$ 1/год)	13,9 %	12,95 %

Таблиця 6.2

Виграш від оптимізації м.о. ПЕВ - $W\{M[C(\tau_{опт})]\}$ для двох структур АФАР за різними значеннями $c_{п1}/c_p$ (формула 6.15)

$c_{п1}/c_p$ Тип структури АФАР	$c_{п1}/c_p = 0,015$ ($c_p = 100$ у. о.)	$c_{п1}/c_p = 0,1$ ($c_p = 100$ у. о.)
1 - а структура ($N=256, m_G=12, \lambda_{ППК}=100 \times 10^{-6}$ 1/год)	97,9 %	88 %
2 - а структура ($N=256, m_G=25, \lambda_{ППК}=100 \times 10^{-6}$ 1/год)	97,6 %	85,97 %

Обговорення:

- a) Вперше розроблено модель оптимального ТО розподільної структури АФАР.
- b) Отримано аналітичні залежності для техніко-економічних характеристик ТО ФАР – КТВ і м. о. ПЕВ.
- c) Визначені критерії оптимізації ТО ФАР - по максимуму КТВ і по мінімуму м.о. ПЕВ.
- d) Як приклад побудовані і досліджені моделі оптимізації ТО двох типових розподілених структур ФАР.
- e) Розроблена номограма для визначення оптимальної періодичності ТО двох типових структур ФАР.
- f) Отримані результати можуть бути використані під час розробки планів гарантійного обслуговування РЛС з АФАР.

6.2.3 Розроблення та дослідження математичної моделі оптимізації технічного обслуговування активної фазованої антенної решітки з дворівневою структурною схемою надійності

Мета розробки:

Побудова математичної моделі оптимального ТО дворівневої АФАР і визначення основних техніко-економічних характеристик і критеріїв оптимізації [82, 96]

Математична модель надійності передавальної АФАР

Математична модель надійності дворівневої передавальної АФАР представлена у третьому розділі: середній наробіток до відмови передавальної АФАР - $T_{0_АФАР}$ визначається з формули 3.23 (розділ третій):

$$\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ПК}} = - \frac{\ln\left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0 S_0}\right)}{1 + \frac{T_{0_ПК}}{T_{0_ППМП}} + \frac{2T_{0_ПК}}{T_{0_МВЕ}}} \quad (6.12)$$

де: $C_{RAD.} = \frac{m_G}{G_0}$ – коефіцієнт надмірності передавальних каналів (ПК) АФАР;

S_0 – число підрешіток в АФАР;

G_0 – число ПК в антенній підрешітці.

Аналітичні вирази для імовірнісних характеристик передавальної АФАР [82]:

- імовірність безвідмовної роботи (ІБР) передавальної АФАР:

$$P_{АФАР}(t) = \sum_{j=0}^{m_S} C_{S_0}^j [P_{ПДР}(t)P_{МВЖ}(t)P_{ППМП}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{ПДР}(t)P_{МВЖ}(t)P_{ППМП}(t)]^j \quad (3.23)$$

- імовірність безвідмовної роботи антенної підрешітки:

$$P_{ПДР.}(t) = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [P_{ПК}(t)P_{МВЖ}(t)]^{G_0-i} [1 - P_{ПК}(t)P_{МВЖ}(t)]^i \quad (3.17)$$

де:

$$P_{ПК}(t) = \exp(-\lambda_{ПК}t), P_{МВЖ}(t) = \exp(-\lambda_{МВЖ}t), Q_{ПК}(t) = 1 - P_{ПК}(t),$$

- $P_{ПК}(t)$, $P_{МВЖ}(t)$, $P_{ПДР.}(t)$ – відповідно, імовірності безвідмовної роботи передавальних каналів (в режимі випромінювання), модулів вторинних джерел живлення і передавальної підрешітки;

- m_G – допустима кількість відмов передавальних каналів в передавальній підрешітці;

- m_S – допустима кількість відмов передавальних підрешіток в АФАР

*Розробка математичної моделі оптимізації технічного
обслуговування передавальної активної
фазованої антенної решітки*

Позначимо τ – періодичність ТО передавальної АФАР; τ_p і c_p – тривалість та вартість проведення ТО АФАР; τ_R і c_R – тривалість та вартість збитку під час АФАР; $P_{АФАР}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи АФАР.

Тоді аналітичний вираз для КТВ та м.о. ПЕВ передавальних АФАР має вигляд згідно формул (6.9, 6.10).

Для визначення імовірностей безвідмовної роботи, щільності розподілу імовірностей і інтенсивності відмов антенної підрешітки і АФАР в цілому використовуються формули для біноміального розподілу технічних систем:

$$P_C(t) = \sum_{i=0}^m C_n^i Q^i(t) P^{n-i}(t), \quad (6.14)$$

$$f_C(t) = (n - m) C_n^m Q^m(t) P^{n-m}(t) f(t), \quad (6.15)$$

$$\Lambda_C(t) = \frac{(n-m) C_n^m Q^m(t) P^{n-m-1}(t) f(t)}{\sum_{i=0}^m C_n^i Q^i(t) P^{n-i}(t)} \quad (6.16)$$

Ефективність оптимізації ТО передавальної АФАР оцінюється виграшами від оптимізації:

- виграш за КТВ – формула (6.14) та виграш за м. о. ПЕВ – формула (6.15)

Приклад 6.2.

Потрібно визначити показники оптимального ТО передавальної АФАР РЛС

Вихідні дані:

Допустиме зниження рівня максимальної дальності РЛС з передавальної АФАР становить:

$$\Delta D/D = 10\% , \text{ тоді відповідно, } \frac{m_G}{G_0} = 0,20.$$

Структурна схема надійності передавальної дворівневої АФАР РЛС включає :

$N_{0_ПК} = 6400$ передавальних каналів;

$S_0 = 100$ передавальних антенних підрешіток;

$G_0 = 64$ передавальних каналів у антенній підрешітці;

$m_G = 14$ – допустима кількість відмов передавальних каналів у передавальній антенній підрешітці;

$m_S = 20$ – допустима кількість відмов передавальних антенних підрешіток у передавальній АФАР.

Відмови передавальних каналів і модулів розподіляються за експоненціальним законом.

Середній наробіток до відмови передавальних каналів АФАР - $T_{0_ПК}$ змінюються від 50 тис. год до 200 тис. год (інтенсивність відмов $\lambda_{ПК}$ змінюється в діапазоні від $0,000005 \text{ год}^{-1}$ до $0,00002 \text{ год}^{-1}$).

Середній наробіток до відмови передавальних каналів антенної підрешітки $T_{0_ПК}$ дорівнює 1,0 млн. год (інтенсивність відмов $\lambda_{ПК} = 0,000001 \text{ год}^{-1}$). Середній наробіток до відмови модулів вторинного електроживлення $T_{0_МВЖ}$ дорівнює 1,0 млн. год (інтенсивність відмов $\lambda_{МВЕ} = 0,000001 \text{ год}^{-1}$).

Щільність розподілу імовірності відмов передавальної підрешітки АФАР:

$$f_{\text{ПДР.}}(t) = 50C_{64}^{14} [P_{\text{ПК}}(t)]^{50} [1 - P_{\text{ПК}}(t)]^{14} \quad (6.17)$$

Щільність розподілу імовірності відмов передавальної АФАР:

$$f_{\text{АФАР}}(t) = 80C_{100}^{20} [P_{\text{ПДР.}}(t)]^{80} [1 - P_{\text{ПДР.}}(t)]^{20} \quad (6.18)$$

Результати рішення прикладу 6.2 представлені у табл. 6.3 і рис. 6.8 – 6.11

Таблиця 6.3

Вихідні дані і результати розрахунків показників надійності та технічного обслуговування передавальної АФАР

Позначення передавальної АФАР	АФАР-1	АФАР-2	АФАР-3
1	2	3	4
Середній наробіток до відмови ПК	200 000 год	100 000 год	50 000 год
Інтенсивність відмов ПК	0,000005 1/год	0,00001 1/год	0,00002 1/ год
Середній наробіток до відмови передавальної АФАР	41336 год (1,00)	20735 год (1,00)	10384 год (1,00)
Значення ЕІБР АФАР при наробітку, відповідної оптимальної періодичності ТО	0,9987	0,9986	0,9985
Оптимальна періодичність ТО АФАР за критерієм: - максимуму КТВ, - мінімуму м.о. ПЕВ	36219 год. (0,8762)	18205 год. (0,8780)	9126 год. (0,8788)
	35992 год. (0,8707)	18093 год. (0,8726)	9071 год. (0,8745)
Виграш від оптимізації ТО АФАР за критерієм: - максимуму КТВ, - мінімуму м.о. ПЕВ	0,698 %	1,35 %	2,56 %
	48,7 %	48,5 %	44,5 %

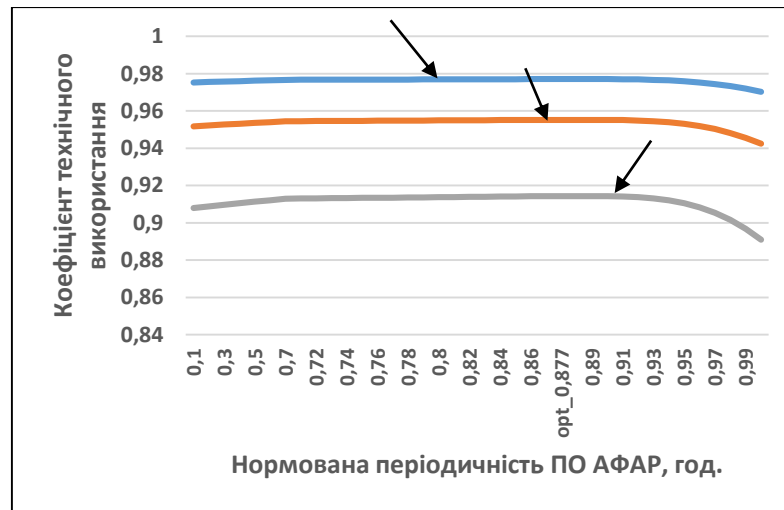


Рис. 6.6 Графіки залежності коефіцієнта технічного використання від періодичності проведення технічного обслуговування АФАР для різних значень інтенсивності відмов випромінюючих каналів: $\lambda_{ПК} = 0,000005$ 1/год - синього кольору; $\lambda_{ПК} = 0,00001$ 1/год - червоного кольору; $\lambda_{ПК} = 0,00002$ 1/год - зеленого кольору

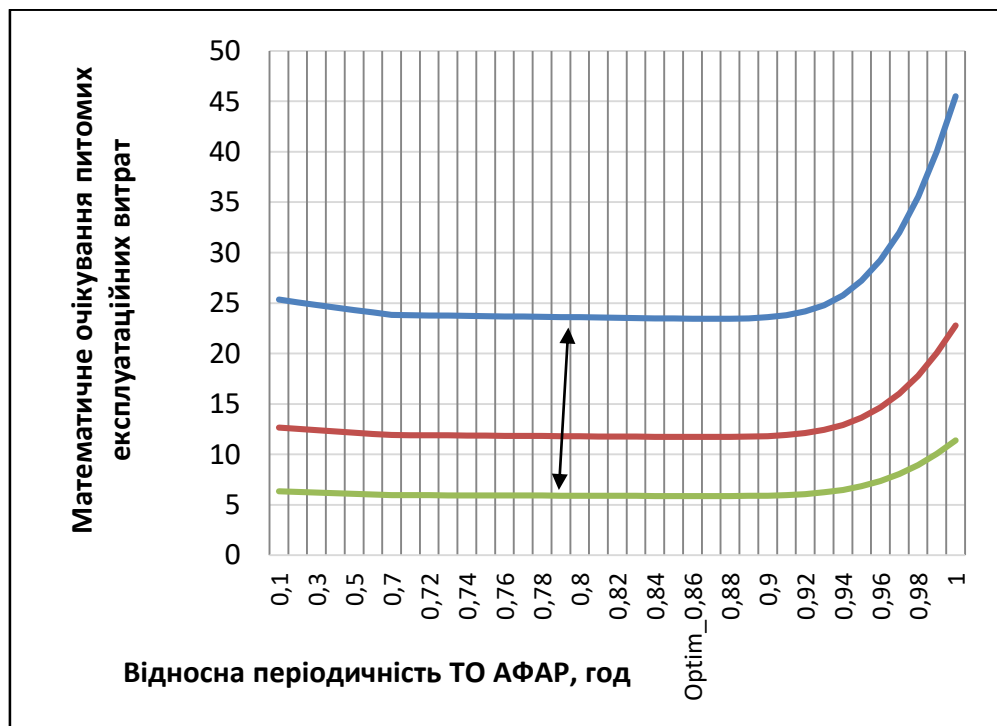


Рис. 6.7 Графіки залежності математичного очікування питомих експлуатаційних витрат від періодичності проведення технічного обслуговування АФАР для різних значень інтенсивності відмов випромінюючих каналів: $\lambda_{RAD.CHAT} = 0,000005$ 1/год – синього кольору; $\lambda_{RAD.CHAT} = 0,00001$ 1/год – червоного кольору; $\lambda_{RAD.CHAT} = 0,00002$ 1/год – зеленого кольору

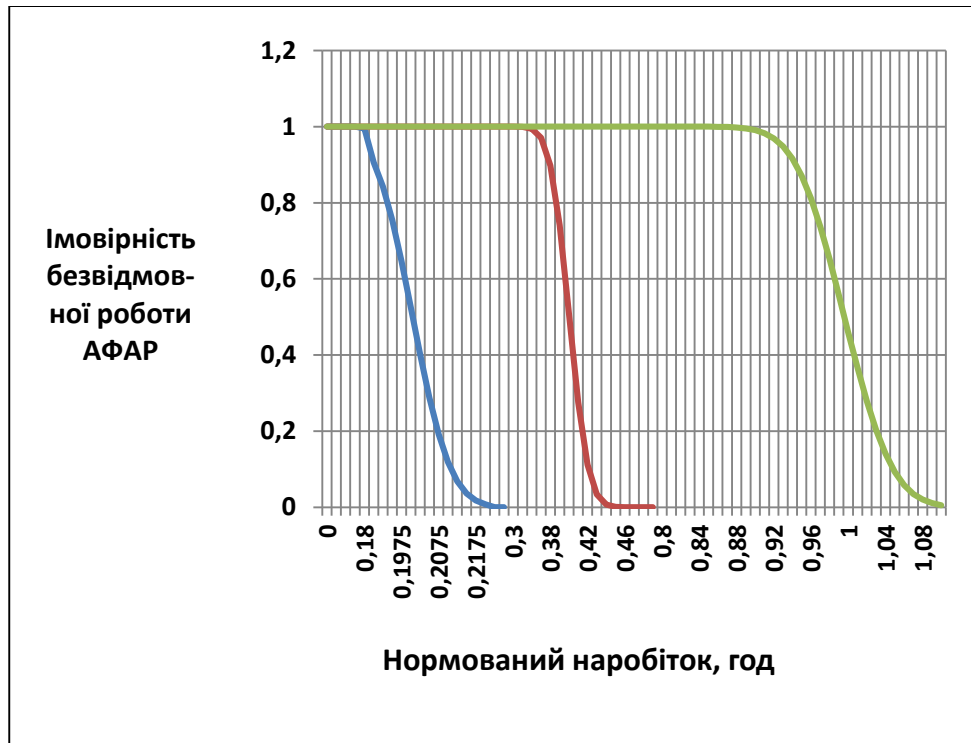


Рис. 6.8 Графіки залежності імовірності безвідмовної роботи АФАР від нормованого наробітку $t / T_{0_АФАР}$: для АФАР - 1 – зеленого кольору; для АФАР - 2 – червоного кольору; для АФАР - 3 – синього кольору

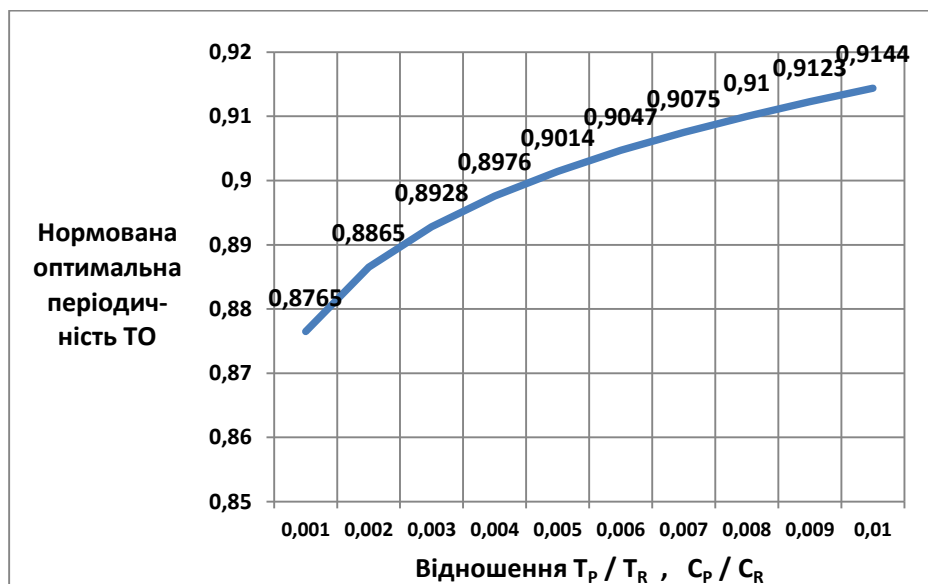


Рис. 6.9 Графік залежності відносної оптимальної періодичності технічного обслуговування АФАР – $\tau_{opt}/T_{0_АФАР}$ від відношення середнього часу заміни одного випромінюючого каналу, який відмовив до середнього часу ремонту АФАР – τ_{P1} / τ_R (від відношення вартості заміни одного каналу, який відмовив до вартості ремонту АФАР – C_{P1} / C_R)

Аналізування отриманих результатів прикладу 6.2

При збільшенні середнього наробітку на відмову передавальних каналів від 50 тис. год. до 200 тис. год. (в 4 рази):

а) збільшується середній наробіток до відмови передавальної АФАР від 10384 год до 41336 год (в 3,98 рази). Тобто число відсотків (%) збільшення надійності передавальної АФАР відповідає числу % збільшення середнього наробітку на відмову передавальних каналів;

б) значення імовірностей безвідмовної роботи АФАР-1 і АФАР-3 при наробітку антенної решітки, відповідної оптимальної періодичності ТО АФАР змінюється в межах від 0,9985 до 0,9987;

в) нормована оптимальна періодичність ТО АФАР за критерієм максимуму КТВ і мінімуму м.о. ПЕВ змінюється в межах від 0,8707 до 0,8788, тобто змінюється несуттєво;

г) значення виграшу від оптимізації ТО АФАР за критерієм максимуму КТВ збільшується несуттєво від 0,698% до 2,56%;

д) значення виграшу від оптимізації ТО АФАР за критерієм мінімуму м.о. ПЕВ є значним, змінюючись від 48,7% до 44,5%.

При зміні значення середнього часу заміни одного випромінюючого каналу, який відмовив до середнього часу ремонту передавальної АФАР-3 - τ_{P1} / τ_R (відношення вартості заміни одного каналу, який відмовив до вартості ремонту АФАР-3 - C_{P1} / C_R) від 0,001 до 0,010 значення відносної оптимальної періодичністю ПО передавальної АФАР-3 - $\tau_{opt} / T_{0_АФАР}$ змінюється в межах від 0,8765 до 0,9144.

Значення імовірності безвідмовної роботи передавальної АФАР-3 змінюються таким чином:

- на інтервалі нормованого наробітку від 0 до 0,875 зменшується від 1,0 до 0,9986;

- на інтервалі від 0,875 до 1,0 зменшується від 0,9986 до 0,461;

- на інтервалі від 0,461 до 1,10 зменшується від 0,461 до 0,0064.

Значення часу для оптимальної періодичності ТО - τ_{opt} відповідає значенню часу відмови 10 підрешіток АФАР (при забезпеченні зниження рівня максимальної дальності РЛС на 10%).

6.3 Розроблення і дослідження математичної моделі оптимізації технічного обслуговування групи активних фазованих антенних решіток, розміщених в одному антенному посту радіолокаційної станції

6.3.1 Загальні положення

У цьому розділі розглядається задача оптимізації технічного обслуговування (ТО) групи з кількох ФАР, що входять в антенний пост РЛС, при немонотонному дифузійному (ДНР) і експоненціальному розподілах (ЕР) відмов НВЧ каналів ФАР. При ТО групи з кількох АФАР, що входять в антенний пост РЛС, групова ТО проводиться з періодичністю τ , при якій передбачається повне оновлення (заміна) усіх НВЧ приймально-передавальних та приймальних (НВЧ) каналів, які відмовили у всіх розподілених структурах АФАР. Основними техніко-економічними характеристиками ТО групи АФАР є: періодичність ТО - τ , коефіцієнт технічного використання (КТВ) групи АФАР $K_{\text{ТВ}_\text{ГР}}(\tau)$ і математичне очікування питомих експлуатаційних витрат (м.о. ПЕВ) – $M_{\text{ГР}}[C(\tau)]$.

У процесі оптимізації ТО групи АФАР визначається оптимальна періодичність $\tau_{\text{опт}_\text{гр}}$ групового ТО за критерієм максимуму КТВ або за критерієм мінімуму м.о. ПЕВ.

6.3.2 Побудова математичної моделі оптимізації групового технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток

Позначимо:

τ - періодичність ТО групи АФАР;

$\tau_{ТВ_i}$ і $C_{ТВ_i}$ – тривалість і вартість проведення ТО i -ї структури АФАР;

$\tau_{Р_i}$ і $C_{Р_i}$ – тривалість ремонту і вартість збитку при аварійному ремонті i -ої структури АФАР;

$P_{A_i}(\tau)$ – ІБР i -ої структури АФАР, $i = \overline{1, n}$.

За цим КТВ групи АФАР визначається за формулою:

$$K_{ТВ_ГР}(\tau) = \frac{\tau}{\tau + \sum_{i=1}^n \tau_{ТВ_i} - \sum_{i=1}^n \tau_{Р_i} \ln P_{A_i}(\tau)}, \quad (6.19)$$

$$\text{де } P_A(\tau) = \sum_{j=0}^m C_N^j [P_k(\tau)]^{N-j} [1 - P_k(\tau)]^j \quad (6.20)$$

ІБР розподіленої структури АФАР.

Для зручності виконання обчислень формулу для ІБР (5.24) можна записати в рекурентній формі:

$$P_A(\tau, N/m) = P_A(\tau, N/(m-1)) + C_N^m [P_k(\tau)]^{N-m} [1 - P_k(\tau)]^m \quad (6.21)$$

де $P_{A_i}(\tau)$, $i = \overline{1, n}$.

n - число розподілених структур АФАР у групі:

$$\tau_{ТВ_i} = \tau_{ТВ0_i} \{1 + N_i[1 - P_{ki}(\tau)]\} \quad (6.22)$$

$\tau_{ТВ_i}$ - тривалість ТО i - ої розподіленої структури АФАР;

$\tau_{ТВ0_i}$ - тривалість ТО одного НВЧ каналу i - ої структури АФАР;

τ_{P_i} - тривалість аварійного ремонту i - ої структури АФАР;

$P_{ki}(\tau)$, - ІБР каналу НВЧ i - ої структури АФАР, $i = \overline{1, n}$

Математичне очікування ПЕВ (м.о. ПЕВ):

$$M_{ГР} [C(\tau)] = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ТВ_i} - \sum_{i=1}^n c_{P_i} \ln P_{A_i}(\tau)}{\tau}, \quad (6.23)$$

де $c_{ТВ_i} = c_{ТВ0_i} \{1 + N_i[1 - P_{k_i}(\tau)]\}$ - вартість проведення ТО i - ої структури АФАР;

$c_{ТВ0_i}$ - вартість проведення ТО одного каналу НВЧ i - ої структури АФАР;

c_{P_i} - вартість збитку від аварії (з урахуванням вартості проведення аварійного ремонту) i - ої структури АФАР.

При оптимізації за критерієм максимуму КТВ оптимальна періодичність ТО групи АФАР одного антенного поста визначається за допомогою узагальненого трансцендентного рівняння:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \tau_{ТВ0_i} \{1 + N_i [1 - P_{ki}(\tau) - \tau f_{k_i}(\tau)]\}}{\sum_{i=1}^n \tau_{P_i} [\ln P_{A_i}(\tau) + \tau \Lambda_{A_i}(\tau)]} = 1 \quad (6.24)$$

При оптимізації за критерієм мінімуму м.о. ПЕВ оптимальна періодичність ТО групи АФАР одного антенного поста визначається за допомогою узагальненого трансцендентного рівняння:

$$\frac{\sum_{i=1}^n c_{ТВО-i} \{1 + N_i [1 - P_{ki}(\tau) - \tau f_{k_i}(\tau)]\}}{\sum_{i=1}^n c_{P-i} [\ln P_{A_i}(\tau) + \tau \Lambda_{A_i}(\tau)]} = 1 \quad (6.25)$$

У цій роботі розглядається процедура визначення оптимальної періодичності ТО групи АФАР для двох типів розподілу відмов НВЧ каналів АФАР:

- при експоненціальному розподілі (ЕР), що враховує тільки раптові відмови ЕРВ;
- при немонотонному дифузійному розподілі (ДНР), що враховує як раптові, так і поступові відмови ЕРВ.

ІБР НВЧ каналу i - ої структури АФАР при ЕР визначається за формулою:

$$P_{k_i}(\tau) = \exp(-\lambda_{k_i} \tau), \quad (6.26)$$

де λ_{k_i} - інтенсивність НВЧ каналу i - ої структури АФАР.

ІБР НВЧ каналу i - ої структури АФАР при ДНР визначається за формулою:

$$P_{k_i}(\tau) = \Phi\left(\frac{T_{0_i} - \tau}{v_i \sqrt{T_{0_i} \tau}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v_i^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0_i} + \tau}{v_i \sqrt{T_{0_i} \tau}}\right) \quad (6.27)$$

де: T_{0_i} - середній час безвідмовної роботи каналу НВЧ i - ої структури АФАР

v_i - коефіцієнт варіації наробітку на відмову каналу НВЧ i - ої структури АФАР.

У формулах (6.24, 6.25) використовуються:

$f_{k_i}(\tau)$ - щільність розподілу відмов НВЧ каналу i - ої структури АФАР;

$\Lambda_{A_i}(\tau) = \frac{f_{A_i}(\tau)}{P_{A_i}(\tau)}$ - інтенсивність відмов i -ої структури АФАР;

$f_{A_i}(\tau)$ - щільність розподілу відмов i -ої структури АФАР.

Щільність розподілу відмов i -ої структури АФАР визначається за формулою:

$$f_{A_i}(\tau) = f_{k_i}(\tau) \sum_{j=0}^m C_N^j \langle [P_{k_i}(\tau)]^{N-j-1} [1 - P_{k_i}(\tau)]^{j-1} \{(N-m)[1 - P_{k_i}(\tau)] - jP_{k_i}(\tau)\} \rangle \quad (6.28)$$

в рекурентній формі:

$$f_{A_i}(\tau, N/m) = f_{A_i}(\tau, N/(m-1)) + C_N^m \langle [P_{k_i}(\tau)]^{N-m-1} [1 - P_{k_i}(\tau)]^{m-1} \{(N-m)[1 - P_{k_i}(\tau)] - mP_{k_i}(\tau)\} \rangle \quad (6.29)$$

Для експоненціального розподілу (ЕР) відмов НВЧ каналів АФАР:

$$f_{k_i}(\tau) = \lambda_{k_i} \exp(-\lambda_{k_i} \tau) \quad (6.30)$$

Для дифузійного немонотонного розподілу (ДНР) відмов НВЧ каналів АФАР (розділ третій)

$$f_{k_i}(\tau) = \frac{\sqrt{T_{0_i}}}{v\tau\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left[-\frac{(\tau - T_{0_i})^2}{2v^2\tau T_{0_i}}\right] \quad (6.31)$$

Приклад 6.3

*Оптимізація технічного обслуговування антенного поста РЛС
з одною приймальною і одною передавальною АФАР*

Початкові дані прикладу представлені у таблиці 6.4.

Вихідні дані прикладу 6.3

Тип АФАР	Загальна кількість НВЧ каналів в АФАР	Кількість основних НВЧ каналів в АФАР	Кількість резервних НВЧ каналів в АФАР	Середній наробіток на відмову НВЧ каналу в АФАР, год	Тривалість профілактичного обслуговування АФАР, год	Тривалість ремонту АФАР, год.	Вартість профілактичного обслуговування АФАР, у.о./ (год×виріб)	Вартість збитків при відмові і аварійному ремонті АФАР, у.о./ (год×виріб)
Приймальна АФАР	61	56	5	5000	0,5	3	40	500
Передавальна АФАР	61	55	6	2500	0,5	3	60	700

У процесі побудови оптимальної моделі ТО АФАР:

- визначаються оптимальні значення періодичності профілактичного обслуговування групи АФАР - τ_{opt} , максимальне КТВ і мінімальне м.о. ПЕВ.
- проводиться порівняння отриманих результатів при використанні ЕР і ДНР відмов НВЧ каналів АФАР.

Рішення прикладу:

ІБР приймальної АФАР визначається за формулою:

$$P_{A1}(\tau) = \sum_{j=0}^5 C_{61}^j [P_{k1}(\tau)]^{61-j} [1 - P_{k1}(\tau)]^j \quad (6.32)$$

ІБР передавальної АФАР визначається за формулою:

$$P_{A2}(\tau) = \sum_{j=0}^6 C_{61}^j [P_{k2}(\tau)]^{61-j} [1 - P_{k2}(\tau)]^j \quad (6.33)$$

Щільність розподілу відмов приймальної АФАР визначається за рекурентною формулою (10):

$$f_{A1}(\tau, 61/5) = f_{A1}(\tau, 61/4) + C_{61}^5 \{ [P_{k1}(\tau)]^{55} [1 - P_{k1}(\tau)]^4 \{ 56[1 - P_{k1}(\tau)] - 5 P_{k1}(\tau) \} \} \quad (6.34)$$

Щільність розподілу відмов передавальної АФАР визначається за формулою:

$$f_{A2}(\tau, 61/6) = f_{A2}(\tau, 61/5) + C_{61}^6 \{ [P_{k2}(\tau)]^{54} [1 - P_{k2}(\tau)]^5 \{ 55[1 - P_{k2}(\tau)] - 6 P_{k2}(\tau) \} \} \quad (6.35)$$

Використовуючи формулу (6.24) для оптимізації за критерієм максимуму КТВ, спочатку визначалися оптимальні періодичності ТО для приймальної і передавальної АФАР, а потім оптимальна періодичність групового ТО для антенного поста в цілому. На рис. 6.10 і 6.11 представлені залежності КТВ від періодичності ТО для приймальної АФАР, передавальної АФАР і групи з двох АФАР для ЕР (рис.6.10) і для ДНР (рис. 6.11) відмов НВЧ каналів АФАР.

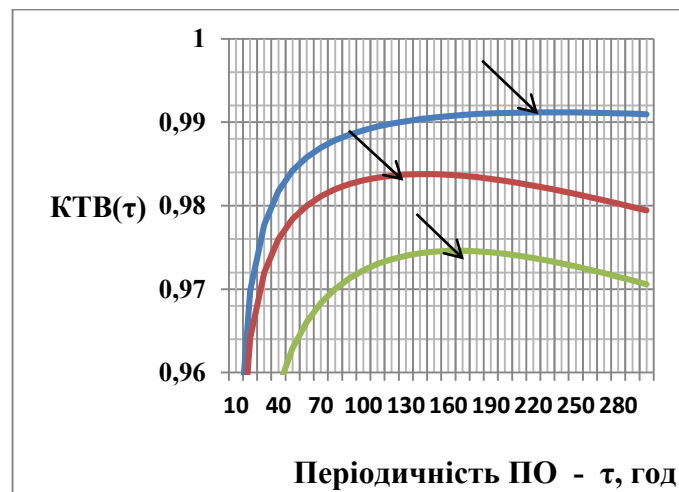


Рис.6.10. Залежність КТВ від періодичності ТО для приймальної АФАР (верхня крива – $\tau_{\text{орт}} = 240$ год), передавальної АФАР (середня крива – $\tau_{\text{орт}} = 140$ год) і групи АФАР (нижня крива – $\tau_{\text{гр.орт}} = 170$ год) для ЕР відмов НВЧ каналів АФАР

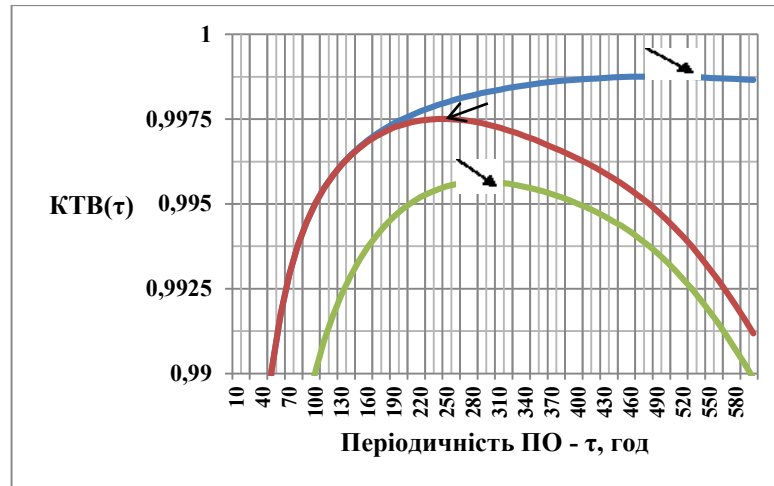


Рис. 6.11. Залежність КТВ від періодичності ТО для приймальної АФАР (верхня крива – $\tau_{\text{опт}}=490$ год), передавальної АФАР (середня крива – $\tau_{\text{опт}}=250$ год) і групи АФАР (нижня крива – $\tau_{\text{гр.опт}}=300$ год) для ДНР відмов НВЧ каналів АФАР

Використовуючи формулу (6.14) для оптимізації за критерієм мінімуму м.о. ПЕВ, спочатку визначалися оптимальні періодичності ТО для приймальної і передавальної АФАР, а потім оптимальна періодичність групового ТО для антенного поста в цілому.

На рис 6.12 і 6.13 представлені залежності м.о. ПЕВ від періодичності ТО для приймальної АФАР, передавальної АФАР і групи з двох АФАР для ЕР (рис. 6.12) і для ДНР (рис. 6.13) відмов каналів АФАР.

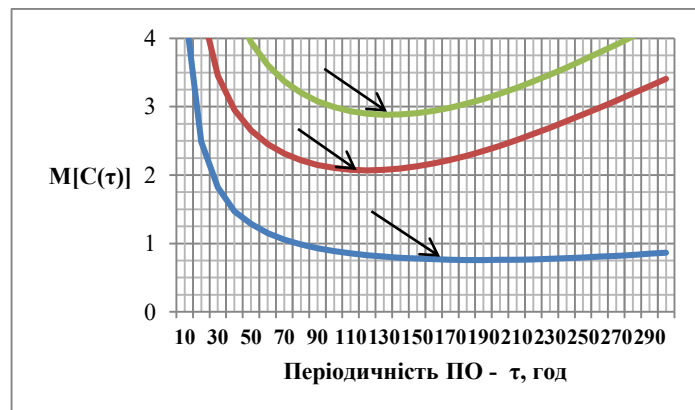


Рис. 6.12. Залежність м.о. ПЕВ від періодичності ТО для приймальної АФАР (нижня крива – $\tau_{\text{опт}}=190$ год.), для передавальної АФАР (середня крива – $\tau_{\text{опт}}=120$ год.) і для групи АФАР (верхня крива – $\tau_{\text{опт}}=130$ год.) при ЕР відмов каналів АФАР

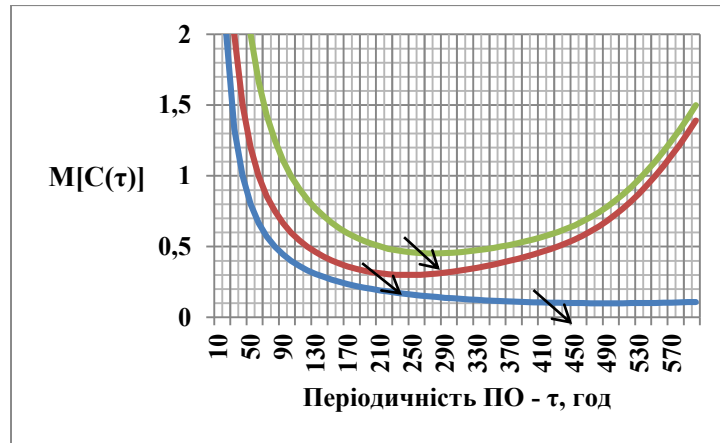


Рис. 6.13. Залежність м.о. ПЕВ від періодичності ТО для приймальної АФАР (нижня крива – $\tau_{\text{орт}} = 490$ год.), для передавальної АФАР (середня крива – $\tau_{\text{орт}} = 250$ год.) і для групи АФАР (верхня крива – $\tau_{\text{гр.орт}} = 280$ год.) при ДНР відмов НВЧ каналів АФАР

На рис. 6.14 показана порівняльна характеристика графіків КТВ приймальної АФАР при ЕР і ДНР відмов НВЧ каналів АФАР

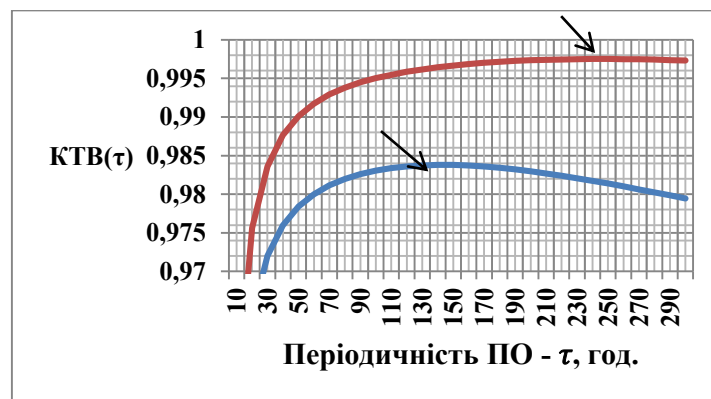


Рис. 6.14 Залежність КТВ від періодичності ТО для приймальної АФАР при ЕР (нижня крива – $\tau_{\text{орт}} = 150$ год.) і ДНР (верхня крива – $\tau_{\text{орт}} = 250$ год.) відмов НВЧ каналів АФАР

На рис. 6.15 представлена порівняльна характеристика графіків м.о. ПЕВ приймальної АФАР при ЕР і ДНР відмов НВЧ каналів АФАР

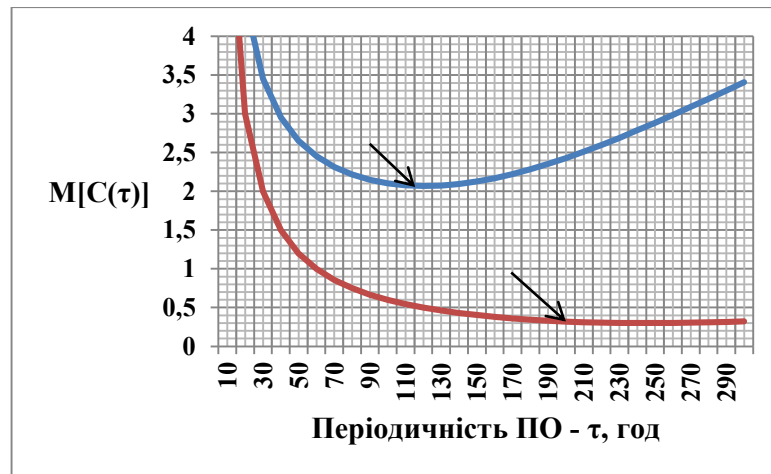


Рис. 6.15. Залежність м.о. ПЕВ від періодичності ТО для передавальної АФАР для ЕР (верхня крива – $\tau_{\text{опт}} = 120$ год.) і ДНР (нижня крива – $\tau_{\text{опт}} = 250$ год.) відмов НВЧ каналів АФАР

Аналіз графіків на рис. 6.11 - 6.15 показує, що значення оптимальної періодичності ТО - $\tau_{\text{опт}}$ для ДНР відмов НВЧ каналів АФАР в 1,6 - 2,1 разів більше ніж значення $\tau_{\text{опт}}$ для ЕР.

На рис. 6.16 представлена номограма для визначення відносної оптимальної періодичності трьох модифікацій розподілених структур АФАР (61/4, 61/5, 61/6) при ЕР відмов каналів АФАР в залежності від логарифма відношення тривалості ПО одного каналу АФАР до тривалості АФАР або логарифма відношення вартості ПО одного каналу АФАР до вартості збитку від раптової відмови і шкоди від АФАР.

Номограма є універсальною і дозволяє визначити оптимальну періодичність в широкому діапазоні від мінімального значення відношення $\ln(t_r/t_p)=0$ при $(t_r/t_p=1)$ до максимального значення $\ln(t_r/t_p) = 3$ при $(t_r/t_p = 1000)$.

З номограми випливає, що значення відносної оптимальної періодичності $Z_{\text{опт}}$ з ростом логарифма відношення $\ln(t_r/t_p)$ або $\ln(c_r/c_p)$ поступово зменшуються.

Примітка 1. При використанні ЕР відмов НВЧ каналів АФАР область визначення відносної оптимальної періодичності ПО - $Z_{\text{опт}} = \tau_{\text{опт}}/T_{0к}$ існує в широкому діапазоні значень від 0,01 до 0,105.

Примітка 2. При використанні ДНР відмов НВЧ каналів АФАР область визначення нормованої оптимальної періодичності ТО - $z_{opt} = \frac{\tau_{opt}}{T_{0,k}}$ існує тільки у вузькому діапазоні в межах від 0,09791 до 0,09797.

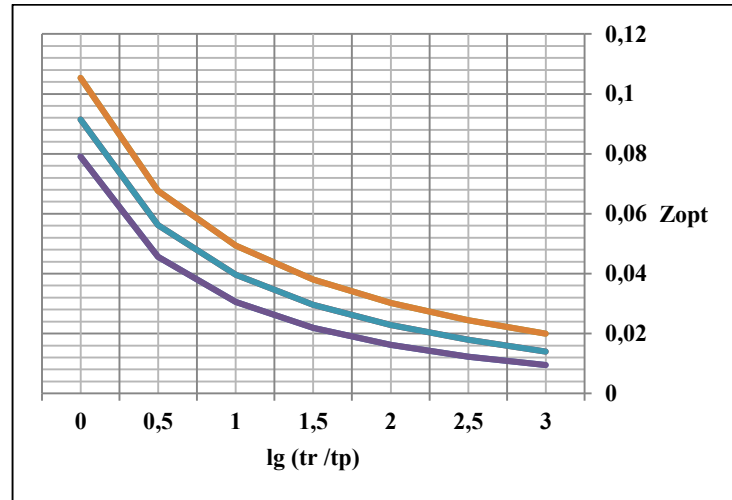


Рис. 6.16. Номограма для визначення відносної оптимальної періодичності ТО - $z_{opt} = \frac{\tau_{opt}}{T_{0,k}}$ для трьох модифікацій розподіленої структури АФАР, що включають 61 НВЧ канал, в залежності від логарифма відношення тривалості (вартості) аварійного ремонту АФАР до тривалості (вартості) ТО одного каналу АФАР, при ЕР відмов каналів АФАР: верхня крива відповідає розподіленій структурі АФАР з 6 резервними каналами, середня крива відповідає структурі АФАР з 5 резервними каналами, нижня крива відповідає структурі АФАР з 4 резервними каналами

Використовуючи номограми на рис. 6.16 і примітку 1 можна визначати відносне значення оптимальної періодичності ТО - $z_{opt} = \frac{\tau_{opt}}{T_{0,k}}$. Потім застосовуючи формули (6.19 - 6.23) можна визначити максимальні значення КТВ або мінімальні значення м.о. ПЕВ.

У табл. 6.5 представлені значення відносної оптимальної періодичності τ_{opt} , максимальні значення КТВ і мінімальні значення м.о. ПЕВ для приймальної

АФАР, передавальної АФАР і групи з двох АФАР при ЕР відмов НВЧ каналів АФАР.

Таблиця 6.5

Значення відносної оптимальної періодичності ТО

Тип АФАР	Оптимізація за критерієм максимуму КТВ			Оптимізація за критерієм максимуму м.о. ПЕВ		
	$Z_{\text{опт}}$	$\tau_{\text{опт}}$, год	$K_{\text{ТВ}}(\tau_{\text{опт.}})$	$Z_{\text{опт}}$	$\tau_{\text{опт}}$, год	$M[C(\tau_{\text{опт.}})]$, у.о./ (год. × виріб)
Приймальна	0,048	240	0,9912	0,038	190	0,7586
Передавальна	0,028	140	0,9838	0,024	120	2,0692
Група з двох АФАР	0,034	170	0,9746	0,026	130	2,8832

У табл. 6.10 представлені значення відносної оптимальної періодичності $\tau_{\text{опт}}$, максимальне значення КТВ і мінімальне значення м.о. ПЕВ для приймальної АФАР, передавальної АФАР і групи з двох АФАР при ДНР відмов НВЧ каналів АФАР.

Таблиця 6.6

Значення відносної оптимальної періодичності

Тип АФАР	Оптимізація за критерієм максимуму КТВ			Оптимізація за критерієм мінімуму м.о. ПЕВ		
	$Z_{\text{опт}}$	$\tau_{\text{опт}}$, год	$K_{\text{ТВ}}(\tau_{\text{опт.}})$	$Z_{\text{опт}}$	$\tau_{\text{опт}}$, год	$M[C(\tau_{\text{опт.}})]$, у.о./ (год*виріб)
Приймальна	0,098	490	0,9988	0,098	490	0,0998
Передавальна	0,050	250	0,9975	0,050	250	0,2997
Група з двох АФАР	0,060	300	0,9957	0,056	280	0,4528

Аналіз даних табл. 6.9 і 6.10 показує, що при використанні ДНР відмов НВЧ каналів АФАР:

- значення відносної оптимальної періодичності ТО - $\tau_{\text{орт}}$ в 1,6 - 2,1 разів більше, ніж значення $\tau_{\text{орт}}$ при використанні ЕР відмов НВЧ каналів;

- максимальні значення КТВ - $K_{\text{ТВ}} (\tau_{\text{опт.}})$ більше, ніж значення КВ ($\tau_{\text{опт.}}$) При використанні ЕР відмов НВЧ каналів;

- мінімальні значення м.о. ПЕВ - $M [C (\tau_{\text{опт.}})]$. менше, ніж значення $M [C (\tau_{\text{опт.}})]$. При використанні ЕР відмов НВЧ каналів.

Отже, для ДНР відмов НВЧ каналів має місце значно більший вигравш в техніко-економічних характеристиках в порівнянні з ЕР відмов НВЧ каналів.

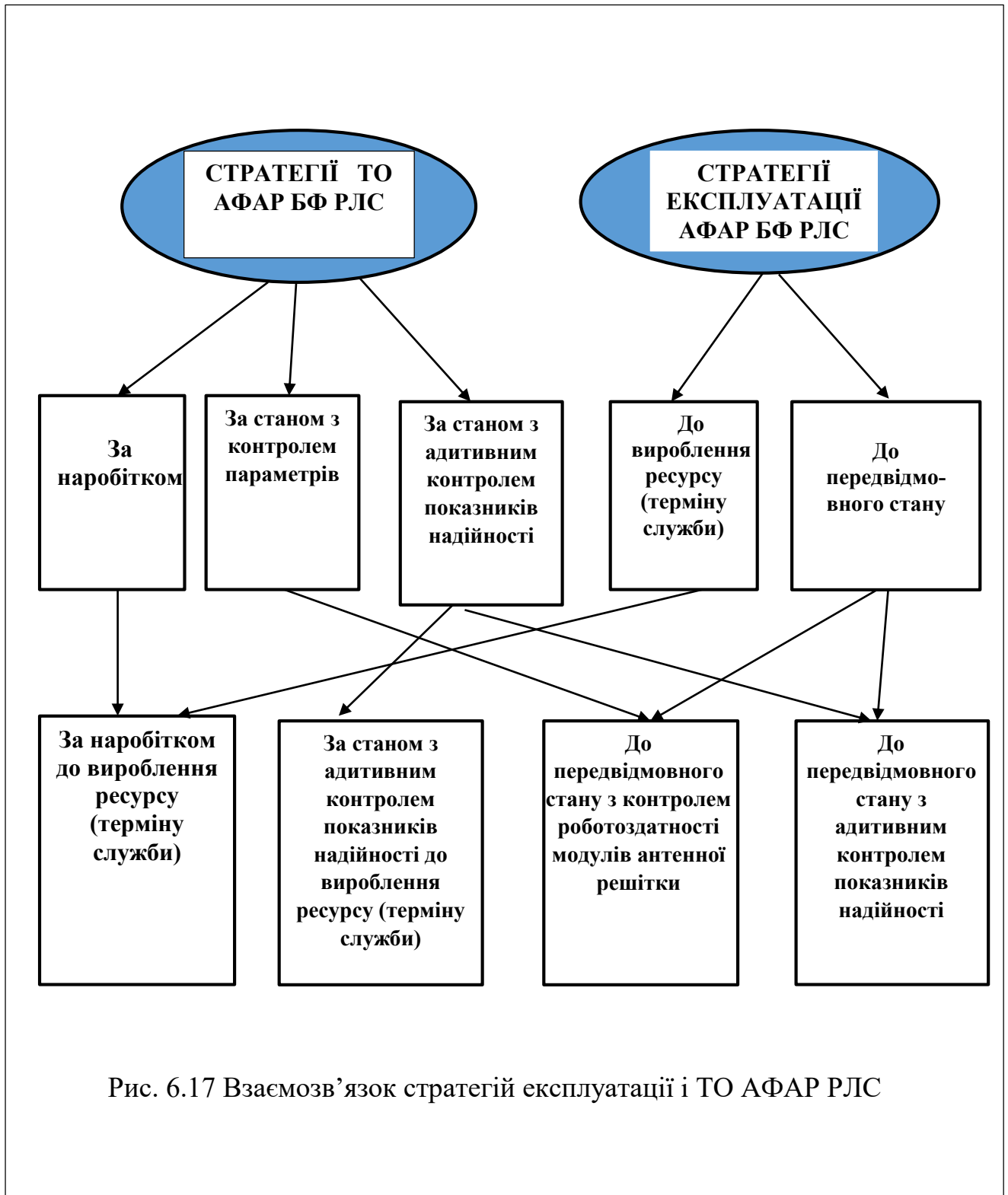
6.4 Розроблення та дослідження методів реалізації стратегій експлуатації та проведення технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій

6.4.1. Взаємозв'язок стратегій експлуатації та технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій

Взаємозв'язок стратегій експлуатації та ТО і Р авіаційної техніки представлена у табл. 1.6 першого розділу дисертаційної роботи. Аналогічно взаємозв'язку стратегій експлуатації та ТО і Р авіаційної техніки (розділ 1) розроблений взаємозв'язок стратегій експлуатації та ТО АФАР БФ РЛС, що представлена на рис. 6.19.

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.



1) Стратегія експлуатації і ТО АФАР за наробітком (до вироблення ресурсу або терміну служби) (перша стратегія експлуатації і ТО АФАР) - це експлуатація РЛС АФАР до моменту вироблення гамма-відсоткового ресурсу - T_{γ} АФАР або моменту настання допустимої кількості відмов модулів антенної решітки (АППМ і ППМП). Після вироблення гамма-відсоткового ресурсу АФАР або відмови допустимої кількості модулів антенної решітки робота РЛС з АФАР призупиняється і приймається рішення про проведення коригуючої заміни модулів. Кількість відмов модулів антенної решітки (АППМ і ППМП) визначаються раніше за результатами державних випробувань і дослідної експлуатації дослідного зразка РЛС з АФАР та обов'язково фіксуються головним конструктором РЛС в експлуатаційній документації АФАР.

Після проведення коригувальної заміни модулів структура АФАР повністю оновлюється (імовірність безвідмовної роботи підвищується до значення близького до 1,000).

2) Стратегія експлуатації і ТО АФАР за станом з адитивним контролем показників надійності до вироблення ресурсу (терміну служби) АФАР (друга стратегія експлуатації і ТО АФАР) - це експлуатація РЛС АФАР до моменту вироблення гамма-відсоткового ресурсу - T_{γ} АФАР або настання допустимої кількості відмов модулів антенної решітки (АППМ і ППМП). Після вироблення гамма-відсоткового ресурсу АФАР або відмови допустимої кількості модулів антенної решітки робота РЛС з АФАР призупиняється і приймається рішення про проведення коригувальної заміни модулів. При цьому значення гамма-відсоткового ресурсу - T_{γ} АФАР і допустимої кількості відмов модулів антенної решітки визначаються і постійно уточнюються у процесі експлуатації РЛС з АФАР. Після чергової відмови модулів антенної решітки (АППМ і ППМП) значення показників надійності модулів уточнюються (перевизначаються) і прогнозуються. При цьому ВСКК РЛС регулярно визначаються значення моментів часу настання наступних відмов

модулів, значення показників надійності і ресурсу АФАР і показників ТО, а також обчислюються (прогнозуються) значення моментів часу виконання і кількості коригувальних замін модулів антенної решітки. При зменшенні значень ЕІБР (у процесі експлуатації АФАР) до рівня $1-\gamma$, робота РЛС з АФАР призупиняється і приймається рішення про коригуючу заміну модулів (АППМ і ППМП), які відмовили.

Під час експлуатації до передвідмовного стану можливі дві стратегії ТО АФАР (третя і четверта стратегії): за станом з контролем параметрів (працездатності) модулів антенної решітки і за станом з адитивним контролем показників надійності (середнього наробітку до відмови і ЕІБР) АФАР. При цьому експлуатація АФАР виконується до настання моменту часу передостанньої відмови модуля (з допустимою кількістю відмов АППМ або ППМП). Після передостанньої відмови модуля (АППМ або ППМП) робота РЛС з АФАР призупиняється і приймається рішення про проведення коригувальної заміни модулів, які відмовили.

3) *Стратегія експлуатації і ТО АФАР до передвідмовного стану з контролем параметрів (працездатності) модулів антенної решітки* (третя стратегія експлуатації і ТО АФАР) - це експлуатація АФАР до настання моменту часу передостаннього відмови модуля (з допустимою кількістю відмов АППМ або ППМП). Під час експлуатації АФАР виконується регулярний контроль працездатності модулів антенної решітки. При цьому постійно проводиться порівняння кількості відмов модулів антенної решітки з допустимою кількістю відмов модулів даного типу.

4) *Стратегія експлуатації і ТО АФАР до передвідмовного стану з адитивним контролем показників надійності (середнього наробітку до відмови і ЕІБР) АФАР* (четверта стратегія експлуатації і ТО АФАР) - це експлуатація АФАР до настання моменту часу передостанньої відмови модуля (з допустимою кількістю відмов АППМ і ППМП). При цьому виконується постійний контроль параметрів (працездатності) модулів антенної решітки і

визначаються моменти настання чергових відмов модулів. При експлуатації РЛС з АФАР проводиться регулярне уточнення (перевизначення) і прогнозування значень показників надійності модулів антенної решітки. Після кожної чергової відмови модуля виконується процедура визначення значень моментів часу настання наступних відмов модулів, значень показників надійності і ресурсу АФАР і показників ТО, а також моментів часу проведення і числа коригувальних заміन модулів антенної решітки. При цьому постійно проводиться порівняння дійсної кількості відмов модулів антенної решітки з допустимою кількістю відмов модулів даного типу. Автоматизований набір і обробку статистичних даних про відмови модулів АФАР забезпечує вбудована автоматизована система контролю і калібрування (ВСКК) РЛС.

Вбудована автоматизована система контролю і калібрування АФАР РЛС також забезпечує:

- оцінку технічного стану різних елементів в каналах і модулях АФАР і обчислювальних пристроїв розподілу фаз;
- визначення місця і типу відмов вузлів, каналів і модулів;
- оцінку інтегральних характеристик і технічного стану АФАР в цілому (контроль технічного стану на системному рівні);
- відстеження змін амплітудно-фазового розподілу і параметрів елементів в каналах АФАР у процесі експлуатації, проведення калібрування АФАР, розрахунок і передачу поправок у систему керування променем для корекції параметрів АФАР на рівні системи.

Мета і завдання дослідження

Основною метою цього розділу (розділ 5.4) є розробка і дослідження методик реалізації стратегій експлуатації та ТО АФАР РЛС за наробітком і станом.

Для досягнення даної мети необхідно вирішення наступних завдань:

- 1) Вибір (з розроблених раніше в третьому розділі) математичних моделей надійності модулів антенної решітки і АФАР в цілому;

- 2) Вибір методу обробки статистичної інформації про відмови модулів антенної решітки в процесі експлуатації;
- 3) Розробка методики визначення показників надійності для стратегії ТО АФАР за наробітком;
- 4) Розробка методики 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;
- 5) Розробка методики реалізації третьої і четвертої стратегії експлуатації і ТО АФАР до передвідмовного стану.
- 6) Порівняння стратегій експлуатації та ТО АФАР

6.4.2 Вибір математичних моделей надійності модулів антенної решітки і активних фазованих антенних решіток

При виборі моделі відмов модулів (каналів) АФАР використовується композиція експоненціального (ЕР) і дифузійного немонотонного розподілів (ДНР). При цьому повна інтенсивність відмов модулів (каналів) визначається як сума інтенсивностей раптових і поступових відмов [30, 31]:

$$\lambda_{\text{мод.повн.відм.}} = \lambda_{\text{мод.рапт.відм.}} + \lambda_{\text{мод.пост.відм.}} \quad (6.36)$$

$$\lambda_{\text{мод.рапт.відм.}} = C_1 \lambda_{\text{мод.повн.відм.}}, \quad \lambda_{\text{мод.пост.відм.}} = C_2 \lambda_{\text{мод.повн.відм.}} \quad (6.37)$$

$$C_1 < 1,0; \quad C_2 < 1,0; \quad C_1 + C_2 = 1,0 \quad (6.38)$$

Тоді ІБР модулів розподіленої структури АФАР визначається як добуток ІБР при раптових і поступових відмовах модулів:

$$P_{\text{мод.}}(t) = P_{\text{мод.рапт.відм.}}(t) P_{\text{мод.пост.відм.}}(t) \quad (6.39)$$

Для характеристики раптових відмов напівпровідникових модулів рапт.відм.використовується експоненціальний розподіл (ЕР):

$$P_{\text{мод.рапт.відм.}}(t) = \exp(-\lambda_{\text{мод.рапт.відм.}} t) \quad (6.40)$$

Для характеристики поступових відмов напівпровідникових модулів використовується дифузійний немонотонний (ДНР) розподіл [32]:

$$P_{\text{мод.пост.відм.}}(t) = 1 - \left[\Phi\left(\frac{t-\mu}{v\sqrt{t\mu}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{t+\mu}{v\sqrt{t\mu}}\right) \right], \quad (6.41)$$

де μ – середній наробіток до поступових відмов модулів для ДНР;

v – коефіцієнт варіації для ДНР.

При виборі моделі надійності АФАР використовуються структурна схема надійності дворівневої АФАР, яка представлена в розділі 3.4 (рис. 3.3. і рис.3.4) і математична модель надійності дворівневої АФАР, яка представлена в третьому розділі:

- трансцендентне рівняння (3.22) для визначення середнього наробітку до відмови АФАР:

$$(\Delta N)_{\text{доп.}} + 1 = N_0 \{ 1 - P_{\text{ППК}}(T_{0\text{АФАР}_1}) P_{\text{ППМП}}(T_{0\text{АФАР}_1}) [P_{\text{МВЖ}}(T_{0\text{АФАР}_1})]^2 \}$$

- формула для ЕІБР антенної підрешітки (3.17):

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

- формула (3.15) для середнього наробітку до відмов антенної підрешітки (для експоненціального розподілу відмов ППК)

$$\frac{T_{0_A_ПОДР.}}{T_{0_ППК.}} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0}\right)}{1 + \frac{T_{0_ППК.}}{T_{0_МВП.}}}$$

- формула для ІБР АФАР у цілому (3.24):

$$P_{\text{АФАР}}(t) = \sum_{j=0}^{m_S} C_{S_0}^j [P_{\text{ПОДР}}(t)P_{\text{МВП}}(t)P_{\text{ППМП}}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{\text{ПОДР}}(t)P_{\text{МВП}}(t)P_{\text{ППМП}}(t)]^j;$$

- формула (3.23) для середнього наробітку до відмов АФАР (для експоненціального розподілу відмов ППК, ППМП і МВЖ)

$$\frac{T_{0_A_ФАР_1}}{T_{0_ППК}} = - \frac{\ln\left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0 S_0}\right)}{1 + \frac{T_{0_ППК}}{T_{0_ППМП}} + \frac{2T_{0_ППК}}{T_{0_МВП}}}$$

- формула (3.26) для гамма-відсоткового ресурсу АФАР - $T_{\gamma_{\text{АФАР.}}}$:

$$P_{\text{АФАР.}}(t = T_{\gamma_{\text{АФАР.}}}) = \gamma_{\text{АФАР}}$$

Для визначення значень m_G (допустимої кількості відмов ППК в антенній підрешітці) і m_S (допустимої кількості умовних відмов антенних підрешіток в АФАР) використовується рішення трансцендентного рівняння (3.27) при виконанні умови $T_{0_A_ФАР_2} \geq T_{0_A_ФАР_1}$:

$$P_{\text{МВЖ}}(t = T_{0_\text{АФАР}_2})P_{\text{ППМП}}(t = T_{0_\text{АФАР}_2})P_{\text{ПДР}}(t = T_{0_\text{АФАР}_2}) = 1 - \frac{m_s}{S_0} - \frac{1}{S_0}$$

6.4.3 Вибір методу обробки статистичної інформації про відмови модулів антенних підрешіток у процесі експлуатації

Для обробки статистичної інформації про відмови модулів АФАР і визначення оцінок вибіркової середньої, верхньої та нижньої довірчих меж використовується метод квантилів [32].

При цьому аналітичний вираз для визначення точкової (середньої) оцінки середнього наробітку до відмови модулів АФАР має вигляд:

$$\tilde{T}_{0_мод} = \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^{m_0} \frac{t_i}{x\left(\frac{i}{N_0}, v\right)}, \quad (6.42)$$

де

$$x\left(\frac{i}{N_0}, v\right) = \frac{t_i}{T_{0_мод_i}} \text{ визначається з рішення нелінійних рівнянь:}$$

$1 - \exp(-x) = q$ - якщо відмови модулів АФАР характеризуються експоненціальним розподілом (ER),

$$1 - \exp(-x) \left\{ 1 - \left[\Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{x+1}{v\sqrt{x}}\right) \right] \right\} = q, \quad (6.43)$$

якщо відмови модулів АФАР характеризуються композицією $DNR \times ER$,

для $q = \frac{i}{N_0}$ і заданого значення коефіцієнта варіації - v .

Формули для визначення оцінки верхньої $\bar{T}_{0_мод}$ і нижньої $\underline{T}_{0_мод}$ довірчих меж середнього наробітку до відмови модулів АФАР мають вигляд:

$$\underline{T}_{0_мод.} = \tilde{T}_{0_мод.} \left[1 + \frac{U_q^2}{2m_0} - \frac{U_q}{2\sqrt{m_0}} \sqrt{4 + \frac{U_q^2}{m_0}} \right], \quad (6.44)$$

$$\bar{T}_{0_мод.} = \tilde{T}_{0_мод.} \left[1 + \frac{U_q^2}{2m_0} + \frac{U_q}{2\sqrt{m_0}} \sqrt{4 + \frac{U_q^2}{m_0}} \right], \quad (6.45)$$

де:

U_q – квантиль нормованого нормального розподілу, при $q = 0,90$ маємо $U_q = 1,282$.

Прогнозування моментів виконання коригувальних заміन модулів АФАР виконується за формулами:

$$\widetilde{\Delta t}_{АППМ}(i) = (t_i - t_1)/i, \quad (6.46)$$

$$\widetilde{\Delta t}_{ПППМ}(j) = (t_j - t_1)/j, \quad (6.47)$$

$$\widetilde{\Delta t}_{МЕ}(l + 1) = (t_l - t_1)/l, \quad (6.48)$$

$$t_{АППМ}(i + 1) = t_i + \Delta t_{АППМ}(i), \quad (6.49)$$

$$t_{ПППМ}(j + 1) = t_j + \Delta t_{ПППМ}(j), \quad (6.50)$$

$$t_{МЕ}(l + 1) = t_l + \Delta t_{МЕ}(l), \quad (6.51)$$

Тут t_0 - значення наробітку зразка АФАР перед початком експлуатації на об'єкті (після проведення попередніх і приймальних випробувань).

Кількість модулів АФАР, що відмовили замінені на справні модулі при корегувальній заміні визначається кількістю модулів, що відмовили відповідно.

Розробка методики визначення показників надійності і ТО для стратегій експлуатації та ТО АФАР за наробітком і станом.

6.4.4 Розроблення методу визначення показників надійності і технічного обслуговування для стратегій експлуатації та технічного обслуговування активної фазованої антенної решітки за наробітком і фактичним станом

У процесі нормальної експлуатації АФАР РЛС апаратурою ВСКК:

- проводиться збір, зберігання і обробка статистичної інформації про відмови модулів антенних підрешіток;
- виконується обчислення (прогнозування) рівня надійності каналів і модулів розподіленої структури АФАР;
- обчислюються індивідуальні прогнозні оцінки фактичного рівня імовірності безвідмовної роботи і гамма-відсоткового ресурсу для кожної конкретної АФАР;
- виробляються рекомендації по часу проведення та обсягу коригувальних замін (КЗ) каналів і модулів антенної решітки, що відмовили для кожної конкретної АФАР.

Після кожної серії відмов модулів даного типу необхідно визначати 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 слідуючих відмов модулів даного типу.

За результатами обробки отриманих даних прогнозуються моменти часу виявлення подальшої серії відмов каналів і модулів даного типу і приймається рішення про необхідність і час проведення коригувальних заміन. 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 коригувальна заміна модулів даного типу може проводитися тільки після вироблення конкретної АФАР гамма-відсоткового ресурсу - T_γ (рис. 6.25). На рис. 6.25 показана зміна експлуатаційної імовірності безвідмовної роботи АФАР до значення $P_{\text{АФАР}}(T_\gamma) = 0,95$ при корегувальній заміні каналів і модулів.

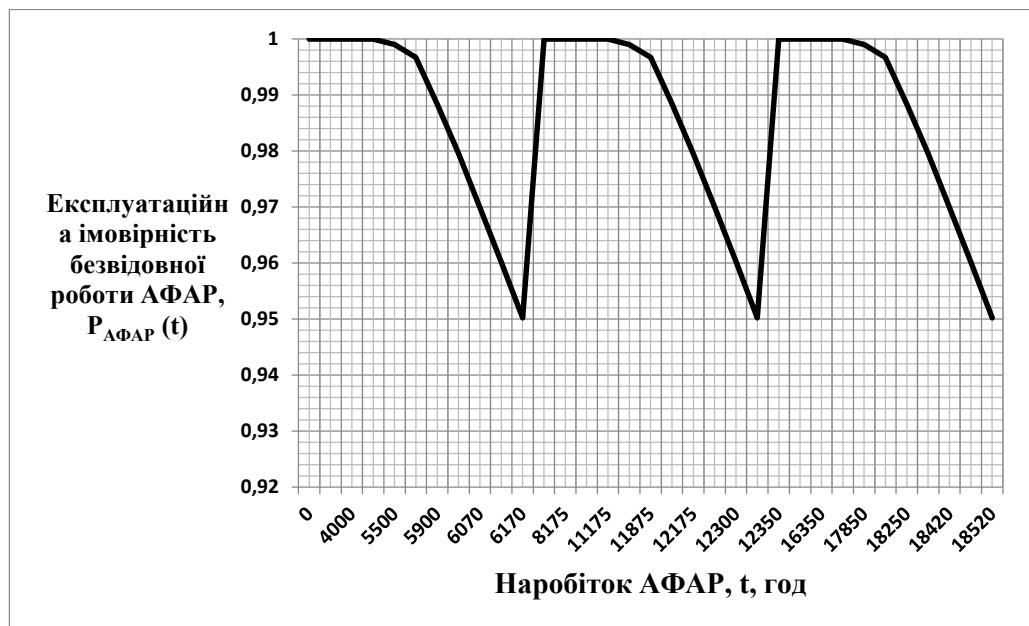


Рис. 6.18 Графік імовірності безвідмовної роботи АФАР, яка обслуговується з контролем показника надійності $P_{\text{АФАР}}(t_{\text{к.з.}}) = P_{\text{АФАР}}(T_\gamma)$

При реалізації стратегії ТО АФАР за наробітком визначаються наступні показники:

- модулів (АППМ і ППМП) антенної решітки за формулами (розділ 4, формули (4.1 - 4.22));

- імовірність безвідмовної роботи АФАР (розділ 3 за формулою (3.24));
- середній наробіток до відмови АФАР визначається з рівняння (3.33) або формули (3.23);
- гамма-відсотковий ресурс АФАР визначається з рівняння (3.26).
- допустима кількість коригувальних заміन модулів АФАР до вироблення гамма-відсоткового ресурсу - $n_{\gamma_{\text{АПМ}}_{\text{доп}}}$ и $n_{\gamma_{\text{ППМ}}_{\text{доп}}}$ визначається за формулами:

$$n_{\gamma_{\text{АПМ}}_{\text{доп}}} = \lambda_{\text{АПМ}} T_{\gamma_{\text{АФАР}}}; \quad n_{\gamma_{\text{ППМ}}_{\text{доп}}} = \lambda_{\text{ППМ}} T_{\gamma_{\text{АФАР}}}. \quad (6.52)$$

При цьому вихідними даними для інтенсивностей відмов елементної бази, на якій розроблено модулі антенної решітки є інформація, отримана з довідників надійності і за результатами прискорених випробувань ЕРВ.

6.5 Висновки до шостого розділу

1. Вперше розроблені математичні моделі оптимізації ТО АФАР з однорівневою і двохрівневою ССН, а також для групи АФАР. Аналітичні вирази для визначення оптимальної періодичності ТО групи АФАР дозволяють побудувати оптимальний регламент гарантійного обслуговування для антенного поста РЛС в цілому.

2. Проведення ТО АФАР в оптимальні терміни може забезпечити значний виграш (до 48%) у витратах порівняно з ремонтом АФАР (після відмови 20 підрешіток).

3. Вперше визначена і побудована структурна схема взаємозв'язку уточнених стратегій експлуатації та ТО АФАР РЛС. Вперше були розроблені методики і алгоритми реалізації стратегії експлуатації і ТО АФАР РЛС.

4. Першу стратегію експлуатації і ТО АФАР РЛС за наробітком до вироблення ресурсу (терміну служби) найбільш ефективно використовувати

при експлуатації РЛС без постійної присутності обслуговуючого персоналу. Другу стратегію експлуатації і ТО АФАР РЛС за станом з контролем рівня надійності до вироблення ресурсу (терміну служби) доцільно використовувати при несвоєчасних поставках запасних модулів антенних решіток, оскільки дозволяє регулювати обслуговуючому персоналу (за необхідності) терміни проведення поточного ремонту і коригувальних замін модулів, не доводячи роботу АФАР до повної відмови.

5. Третя і четверта стратегії експлуатації і ТО АФАР РЛС до передвідмовного стану не рекомендується застосовувати при несвоєчасному постачанні запасних модулів антенних решіток.

6. Четверта стратегія експлуатації і ТО АФАР РЛС до перед відмовного стану з контролем показників надійності найбільш ефективно може використовуватися при експлуатації РЛС з кваліфікованим обслуговуючим персоналом, який може своєчасно регулювати терміни поточного ремонту АФАР і коригувальних замін модулів.

Список публікацій здобувача за матеріалами шостого розділу

1. 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**)

2. 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

3. Костановский В.В., Козачук О.Д. Оптимизация технического обслуживания группы из нескольких фазированных антенных решеток антенного поста РЛС при диффузионном немонотонном и экспоненциальном распределениих времени безотказной работы каналов решетки. *Науковий*

журнал Інституту проблем математичних машин і систем НАН України «Математичні машини і системи». 2017, № 1. С. 122-127.

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

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

6. Козачук О.Д., Костановський В.В., Мачалін І.О., Терентьева І.А. 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.

7. Костановський В.В. Оптимізація технічного обслуговування фазированих антенних решіток. *Збірник тез доповідей науково-технічної конференції 17 – 19 листопада 2014 року «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку навігації, спостереження та організації повітряного руху GNS/ATM»*. Державне космічне агентство України, Укр. Аеро. Рух., НАУ, Інститут аеронавігації. С. 63-64.

8. 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.

9. 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 Украины»*. 2012, № 9. С. 29-35.

РОЗДІЛ 7

МЕТОДИ І ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

7.1 Постановка завдань

Сьомий розділ дисертації присвячений розробці методичних і практичних рекомендацій щодо забезпечення високої експлуатаційної надійності та ефективності в процесі розроблення і експлуатації АФАР РЛС. У розділі 7.2 представлені рекомендації з розроблення вимог для технічного завдання на створення РЛС з АФАР та програми робіт щодо забезпечення надійності. У розділі 7.3 розглядаються практичні рекомендації щодо застосування моделі оптимального профілактичного обслуговування та реалізації стратегій експлуатації та ТО АФАР РЛС.

7.2 Практичні рекомендації щодо визначення вимог до показників надійності та експлуатації під час розроблення радіолокаційних станцій з активними фазованими антенними решітками

7.2.1 Розроблення технічного завдання на розробку радіолокаційних станцій з активними фазованими антенними решітками

Створення нових цивільних (аеродромних) і військових (виявлення, супроводу і цілевказівки) РЛС є багатоетапним процесом, що включає роботи

з проектування, розробки робочої конструкторської документації (РКД), виготовлення дослідних зразків, проведення попередніх та державних випробувань дослідних зразків, виготовлення та випробування серійних, зразків і прийняття їх в експлуатацію [218 - 220].

Розроблення нових РЛС з АФАР проводиться на основі технічного завдання, в якому формулюється 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.

7.2.2 Визначення вимог щодо показників надійності, ефективності експлуатації і технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій

Вимоги до показників надійності, ефективності експлуатації і ТО РЛС визначаються комплексом військових і цивільних стандартів [218, 219]

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.

Основні вимоги до режимів роботи радіолокаційних станцій

Станція має забезпечити функціонування в наступних режимах:

- «Черговий»;
- «Робота за основним призначенням»;
- «Функціональний контроль»:
 - контроль працездатності;
 - пошук несправностей;
 - калібрування;
- «Тренаж»;

- «Технічне обслуговування».

Основні характеристики структурної схеми АФАР

До характеристик структурної схеми АФАР, які визначають її показники надійності відносяться:

- кількість приймально-передавальних каналів (ППК) - $N_{0_ППК}$;
- кількість антенних приймально-передавальних модулів (АППМ) - $N_{0_АМ}$;
- кількість антенних фазованих підрешіток – S_0 ;
- кількість ППК в антенній фазованій підрешітці – G_0 ;
- допустиме зменшення максимального рівня дальності станції – $\Delta D/D_0$.

Вимоги за показниками надійності радіолокаційних станцій

- середній наробіток на відмову – T_0 ;
- оперативний час роботи РЛС в різних режимах – t_0 ;
- імовірність безвідмовної роботи за оперативний час – $P(t_0)$;
- середній час відновлення працездатного стану станції після відмови (без урахування часу доставки ЗІП) – $\tau_{відн.}$;
- коефіцієнт готовності станції – K_r ;
- коефіцієнт технічного використання станції – $K_{ТВ}$;
- призначений ресурс станції до капітального ремонту (до списання);
- призначений термін служби станції до капітального ремонту (до списання) – $T_{сл.кап.рем.} (T_{сл.спис.})$.

Забезпечення і контроль заданих вимог щодо надійності повинні проводитися відповідно до «Програми забезпечення надійності» (ПЗНр), що розробляється на етапі ескізного проектування (ЕП) [6.5].

Додаткові вимоги за показниками надійності,

експлуатації та ТО для АФАР РЛС

- Середній час наробітку до відмови АФАР – $T_{0_АФАР}$;
- імовірність безвідмовної роботи за оперативний час – $t_{0_АФАР}$;

- середній час на проведення коригувальної (профілактичної) заміни одного модуля антенної решітки - $\tau_{ПЗ_1}$;

Організація відновлення і поточного ремонту модулів і каналів АФАР (наявність автономного ремонтного центру або сервісного обслуговування).

Вимоги щодо експлуатації, ТО і ремонту РЛС

Для РЛС с АФАР повинні бути визначені такі основні етапи експлуатації:

- введення в експлуатацію;
- технічна штатна експлуатація:
 - приведення в готовність до використання за призначенням;
 - підтримання встановленого ступеня готовності;
 - бойові та навчальні режими роботи;
 - зберігання;
 - транспортування;
- зняття з експлуатації.

До організації експлуатації РЛС пред'являються наступні основні вимоги:

- мінімізація обсягів і термінів розгортання для бойового чергування;
- здійснення контролю виконання процесів експлуатації з використанням автоматизованих засобів;

Гарантійний термін експлуатації РЛС повинен бути (від 1 року до 5 років за погодженням з організацією замовника).

Конструкція елементів станції повинна дозволяти проведення усіх видів технічного обслуговування особовим складом згідно з експлуатаційною документацією (ЕД).

Ремонтпридатність апаратури станції повинна забезпечуватися такими заходами:

- можливістю вільного доступу до окремих елементів системи;
- повнотою і доступністю комплекту ЗІП.

Технічне обслуговування станції повинно здійснюватися за фактичним технічному станом для радіоелектронних засобів і носити планово-попереджувальний характер для механічних частин агрегатів.

Апаратура станції повинна бути ремонтпридатною в польових умовах.

Конструкція станції повинна передбачати можливість ТО і ремонтів відповідно до вимог ЕД.

Поточний ремонт станції повинен проводитися агрегатним методом з використанням комплекту ЗПП-О.

Розробники РЛС на етапі розробки ЕП повинні визначити і обґрунтувати значення наступних експлуатаційних характеристик:

- час приведення у встановлені ступені готовності;
- час розгортання (згортання);
- час перебування у встановлених ступенях готовності;
- періодичність і тривалість проведення контролю технічного стану і технічного обслуговування;
- глибину і достовірність пошуку несправностей;
- максимальний час усунення несправностей;
- середню трудомісткість поточного і середнього ремонту;
- чисельність особового складу необхідного для проведення усіх видів ТО і ремонту;
- вартість експлуатації (визначається на етапі розробки КД).

Розробник станції на етапі розробки ЕП повинен обґрунтувати необхідну кількість і необхідний рівень кваліфікації особового складу для забезпечення експлуатації РЛС.

Комплект ЕД на станцію розробляється на етапі РКД.

Комплект ЕД, розроблений на станцію, повинен містити відомості в обсягах, необхідних для навчання і підготовки особового складу, який експлуатує РЛС, організації виконання процесу експлуатації, ведення обліку

результатів експлуатації та відомостей про стан устаткування, що експлуатується.

В РЛС повинна бути передбачена система контролю технічного стану та інформаційно-довідкова система, що забезпечує вирішення таких основних завдань:

- автоматичний функціональний контроль працездатності станції за узагальненими параметрами з індикацією стану;
- видачу інформації про основні параметри апаратури РЛС за запитом оператора;
- автоматизований пошук і локалізація місця несправності з точністю від одного до трьох типових елементів заміни (осередків, нерозбірних субблоків та блоків);
- прогнозування зміни технічного стану апаратури складових частин станції.

На етапі розробки ЕП має бути обґрунтовано необхідну кількість і необхідний рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу для забезпечення експлуатації станції.

Станція має бути стійкою до впливу зовнішніх факторів (механічних, кліматичних, біологічних) на всіх етапах експлуатації.

Робочий діапазон температур навколишнього середовища на всіх етапах експлуатації станції – від мінус 40°C до плюс 50°C.

7.3 Рекомендації щодо розроблення «Програми забезпечення надійності радіолокаційних станцій з активними фазованими антенними решітками на стадії розробки»

7.3.1 Основою для складання «Програми забезпечення надійності (ПЗР) РЛС з АФАР (далі «Виріб») на стадії розробки» є технічне завдання (ТЗ),

7.3.2 Кількісні значення показників надійності радіолокатора протягом всього терміну експлуатації в умовах, встановлених цим ТЗ, повинні бути:

- середній наробіток до відмови - не менше год.

- середній час відновлення працездатного стану РЛС не більше год. з моменту виявлення несправності без урахування часу доставки справної апаратури.

7.3.3 Забезпечення та контроль заданих вимог по надійності повинні проводитися відповідно до Програми забезпечення надійності, розробленої на етапі розроблення ЕП відповідно до вимог [3.2.1].

7.3.4 Матеріали ТП повинні містити попередній аналіз видів, наслідків та критичності відмов. На етапі розробки конструкторської документації (КД) повинен бути проведений уточнений.

7.3.5 На етапі розробки КД повинен бути випущений перелік критичних елементів або висновок про їх відсутність. По завершенні наземних випробувань перелік критичних елементів повинен бути уточнений (при їх наявності).

7.3.6 У матеріалах ЕП і ТП повинен бути приведений обсяг експериментальної відпрацювання Виробу (види, цілі і завдання випробувань, кількість зразків), необхідної для підтвердження заданих технічних характеристик.

7.3.7 На етапі розробки КД повинна бути випущена комплексна програма експериментального відпрацювання, в якій уточнюється обсяг і порядок проведення відпрацювання.

7.3.8 Вимоги експлуатації, зберігання, зручності технічного обслуговування і ремонту для Виробу визначені наступні основні етапи експлуатації:

- введення в експлуатацію;

- технічна штатна експлуатація:

- 1) приведення в готовність до використання за призначенням;
- 2) підтримання встановленого ступеня готовності;
- 3) бойові та навчальні режими роботи;
- 4) зберігання;

- 5) транспортування;
- 6) зняття з експлуатації.

7.3.9 До організації експлуатації телефону пред'являються наступні вимоги:

- мінімізація обсягів і термінів розгортання для бойового чергування;
- здійснення контролю виконання процесів експлуатації з використанням автоматизованих засобів;
- автоматизація операцій і наявність дистанційного контролю і управління;
- скорочення до мінімуму не технологічних і не автоматизованих операцій.

7.3.10 Гарантійний термін експлуатації телефону повинен бути не менше років (у складі ЗРК - років), в тому числі не менше 2 років в польових умовах, з урахуванням застосування комплекту ЗПП-Г.

7.3.11 Призначений термін служби, а також кількість і терміни проведення капітальних ремонтів Виробу встановлюються з урахуванням результатів проведених заходів з продовження терміну експлуатації ЗРС після закінчення гарантійного терміну експлуатації.

7.3.12 Конструкція елементів Виробу повинна дозволяти проведення всіх видів технічного обслуговування особовим складом згідно з експлуатаційною документацією.

7.3.13 Для забезпечення можливості оперативного виявлення і усунення несправностей приладу, складника і технологічного обладнання Вироби, повинні мати чіткі позначення (маркування).

7.3.14 Конструкція складових частин Виробу повинна забезпечувати можливість їх модернізації в процесі експлуатації шляхом заміни блоків.

7.3.15 Ремонтпридатність апаратури Виробу повинна забезпечуватися дотримання заходів:

- можливістю вільного доступу до окремих елементів системи;
- повнотою і доступністю комплекту ЗПП.

7.3.16 Технічне обслуговування Виробу повинно здійснюватися за фактичним технічним станом для радіоелектронних засобів і носити планово-попереджувальний характер для механічних частин агрегатів

7.3.17 Апаратура Виробу повинна бути ремонтпридатною у військових умовах

7.3.18 Конструкція Виробу повинна передбачати можливість технічного обслуговування (ТО) і ремонтів відповідно до вимог експлуатаційної документації (ЕД)

7.3.19 Поточний ремонт Виробу повинен проводитися агрегатним методом з використанням комплекту ЗПП-О

7.3.20 Забезпечення умов експлуатації телефону має здійснюватися використанням комплектів ЗПП-О і ЗПП-Г капітальних ремонтів Виробу встановлюються з урахуванням результатів проведених заходів з продовження терміну експлуатації ЗРС після закінчення гарантійного терміну експлуатації.

7.3.21 Конструкція елементів Виробу повинна дозволяти проведення всіх видів технічного обслуговування особовим складом згідно з експлуатаційною документацією.

7.3.22 Для забезпечення можливості оперативного відшукування і усунення несправностей прилади, складники і технологічне обладнання Виробу, повинні мати чіткі позначення (маркування).

7.3.23 Конструкція складових частин Виробу повинна забезпечувати можливість їх модернізації у процесі експлуатації шляхом заміни блоків.

7.3.24 На етапі розробки ЕП для складових частин Виробу повинні бути визначені попередні склади комплектів ЗПП і схема роботи з комплектами ЗПП

7.3.25 На етапі розробки КД, для складових частин Виробу повинні бути розроблені склади комплектів ЗПП, схема роботи з комплектами ЗПП і визначено порядок їх поповнення протягом гарантійного терміну.

7.3.26 У ПЗНр входять такі основні заходи, що виконуються в процесі ДКР:

- аналіз вимог щодо надійності, встановлених в ТТЗ (ТЗ), умов і специфіки експлуатації виробу;
- збір і аналіз інформації про надійність вітчизняних і зарубіжних аналогів (складових частин, що існують і планованих до серійного виробництва);
- прогнозування надійності можливих варіантів схемної і конструктивної побудови виробів;
- попередній вибір і обґрунтування елементної бази і конструкційних матеріалів стосовно вибраного варіанту побудови виробу;
- розподілу вимог щодо надійності, що пред'являються до зразка, між складовими частинами, включення відповідних вимог в ТЗ на виконання складових частин ДКР, контроль за їх реалізацією;
- вибір і обґрунтування конструктивних способів забезпечення необхідного рівня надійності (резервування різними способами, використання вбудованих засобів контролю і діагностування, застосування складових частин в полегшених режимах, використання конструктивних способів забезпечення ремонтпридатності);
- періодичний розрахунок показників надійності виробу для оцінки відповідності розробляються варіанти вимог щодо надійності, встановлені в ТТЗ (ТЗ), і ефективності обраних схемних і конструктивних способів забезпечення надійності;
- аналіз можливих видів відмов, оцінка їх наслідків та повторюваності, складання і періодичне коригування переліків складових частин, що лімітують надійність зразка (складових частин), розробку заходів щодо попередження найбільш небезпечних відмов та їх наслідків;
- аналіз і оцінка впливу зовнішніх факторів, що впливають на надійність виробу, спрямованих на підвищення стійкості виробу до зовнішніх чинників;
- планування експериментального відпрацювання зразка, складових частин з урахуванням вимог щодо надійності, включаючи визначення обсягів випробувань, обґрунтування точності і достовірності оцінок показників

надійності на основних етапах експериментального відпрацювання, встановлення вирішальних правил для оцінки завершеності експериментального відпрацювання і переходу від одного етапу до іншого;

- проведення експериментального відпрацювання, оцінки показників надійності зразка, складових частин;

- аналіз причин несправності, проведення необхідних доробок і оцінки їх ефективності, збір і накопичення даних про несправності і вжиті заходи щодо усунення їх причин в процесі експериментального відпрацювання;

- визначення оптимального складу і розміщення комплектів ЗІП для забезпечення надійності Виробу.

Вибір і обґрунтування оптимальних способів технічного обслуговування (ТО) і ремонтів в частині видів, періодичності, обсягів і методів проведення робіт з оцінки технічного стану, виявлення несправностей, їх попередження та усунення з урахуванням прийнятої системи експлуатації;

- встановлення вимог щодо забезпечення (підтримки) надійності виробу на стадії експлуатації в експлуатаційній та ремонтній документації (якщо передбачена розробка ремонтної документації);

- відповідність виробу вимогам щодо надійності, встановленим в ТТЗ (ТЗ), визначення необхідності доробок, оцінку впливу пропонованих доробок на рівень надійності виробів;

- оцінка за результатами проведення приймальних випробувань;

- розробка звітних документів, встановлених в ПЗНр.

7.3.27 У таблиці 7.1 представлений перелік робіт щодо забезпечення надійності РЛС з АФАР, які входять до ПЗНр на стадії ескізного проектування.

Таблиця 7.1

**Перелік робіт щодо забезпечення надійності, які входять до ПЗНр
Виробу на стадії ескізного проектування**

№	Заходи щодо забезпечення надійності	Термін виконання	Нормативні і організаційно-методичні документи	Звітні документи
1	2	3	4	5
1	Аналіз вимог до надійності виробів, встановлених в ТЗ		ГОСТ 27.003-90 ДСТУ 2860-94	Матеріали в ПЗ ЕП
2	Розроблення ПЗНр на Виріб і складники (підприємства-контрагенти)		ДСТУ 2863-94, ГОСТ В 15.206-84	Затвердження ПЗНр на виріб і його складові частини
3	Аналіз інформації про досягнений рівень надійності вітчизняних і зарубіжних аналогів		ГОСТ 27.003-90	Матеріали в пояснювальну записку (ПЗ)

Продовження таблиці 7.1

1	2	3	4	5
4	Аналіз схемних і конструктивних рішень, забезпечують виконання заданих вимог з надійності		ГОСТ 27.003-90	Матеріали в пояснювальну записку (ПЗ)
5	Аналіз математичних моделей розрахунку надійності АФАР		ГОСТ 27.301	Матеріали в ПЗ
6	Розроблення і аналіз вимог з надійності складових частин		ГОСТ 27.003	Зведений перелік вимог по надійності на складові частини виробу
7	Складання розділів по надійності технічних завдань на розробку складових частин ГОСТ 27.301-95		ГОСТ 27.003	Розділи ТЗ по надійності складових частин
8	Моделювання процесів функціонування та визначення показників безвідмовності АФАР при відмові різного числа приймально-передавальних моделей і прийомних каналів		ГОСТ 27.301	Матеріали в ПЗ ЕП

Продовження таблиці 7.1

1	2	3	4	5
9	Аналіз впливу зовнішніх чинників (температури) на надійність виробу і його складових частин		Інформація про надійність фірм-виробників ЕРВ	Матеріали в ПЗ ЕП
10	Аналіз переліків можливих видів відмов		ГОСТ 27.003	Попередній перелік можливих видів відмов
11	Складання переліків можливих видів відмов		ГОСТ 27.003	
12	Складання переліків критеріїв відмов і граничних станів і його аналіз		ГОСТ 27.003	
13	Аналіз видів, наслідків та критичності відмов		ГОСТ 27.003	Звіт щодо попереднього аналізу
14	Розробка пропозицій до заходів щодо попередження відмов і захисту від їх наслідків	.	ГОСТ 27.003	Матеріали в ПЗ ЕП

Продовження таблиці 7.1

1	2	3	4	5
15	Аналіз плану експериментального відпрацювання об'єктів		-	Матеріали в ПЗ ЕП
16	Розробка програми і поведінки випробувань макетів НЧ і макетів об'єктів в цілому		-	Матеріали в ПЗ ЕП
17	Аналіз способів резервування	.	ГОСТ 27.301	Матеріали в ПЗ ЕП
18	Попередній розрахунок надійності і його аналіз		ГОСТ 27.301	Матеріали в ПЗ ЕП
19	Попередній аналіз і обґрунтування системи технічного обслуговування та ремонту при експлуатації		ГОСТ 26656-85	Матеріали в ПЗ
20	Аналіз параметрів для діагностування		ГОСТ 26656-85	Матеріали в ПЗ
21	Визначення вихідних даних для розрахунку ЗІП-0 і ЗІП-Г		ГОСТ 2.902	Матеріали в ПЗ

Завершення таблиці 7.1

22	Попередній розрахунок комплекту ЗІП-0 і ЗІП-Г		ГОСТ 2.902	Матеріали в ПЗ
23	Аналіз реалізації ПЗНр на етапі ескізного проектування		ДСТУ 2863-94,	Матеріали в ПЗ

7.4 Практичні рекомендації щодо застосування моделі оптимального технічного обслуговування та реалізації стратегій експлуатації та технічного обслуговування за наробітком і станом активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій

У шостому розділі розглянуті математичні моделі оптимального технічного обслуговування (ТО) АФАР РЛС і стратегії експлуатації та ТО за наробітком і фактичним станом [62].

Під час введення в експлуатацію РЛС (на етапі гарантійного обслуговування) відсутня статистична інформація про відмови каналів і модулів антенної решітки, тому на цьому етапі експлуатації доцільно застосування моделей оптимального ТО АФАР. У процесі подальшої експлуатації після накопичення інформації про відмови ППК (АППМ) можна буде поступово переходити до використання стратегій експлуатації та ТО за фактичним станом.

7.5 Методичні вказівки та алгоритми реалізації стратегій експлуатації і технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій

Реалізація стратегій експлуатації і ТО АФАР РЛС виконується на основі вихідних даних щодо надійності представлених у табл. 7.2.

Таблиця 7.2

Перелік вихідних даних щодо надійності для реалізації стратегій експлуатації і ТО АФАР РЛС

Номер стратегії експлуатації і ТО АФАР	Позначення стратегії експлуатації і ТО АФАР	Початкові дані з показників надійності АФАР
1	2	3
Перша	До набіртки до вироблення ресурсу (терміну служби)	$T_{\text{рес_АФАР}}, T_{\text{сл_АФАР}}, T_{\text{о_АФАР}}$
Друга	За станом з адитивним контролем показників надійності до вироблення ресурсу (терміну служби)	$T_{\text{сл_АФАР}}, T_{\text{о_АФАР}}, T_{\gamma_АФАР}$ при $\gamma=0,60$
Третя	До перед відмовного стану з контролем працездатності модулів антенної решітки	$T_{\text{рес_АФАР}}, T_{\text{сл_АФАР}}, T_{\text{о_АФАР}}, (\Delta N/N_0)_{\text{доп}} - 1.$
Четверта	До передвідмовного стану з адитивним контролем показників надійності	$T_{\text{сл_АФАР}}, T_{\text{о_АФАР}}, R_{\text{зип}}(T_{\text{зип}})$

Для реалізації 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, представлені на рис. 7.1 і рис. 7.2.

На рис. 7.1 представлений алгоритм реалізації стратегії експлуатації і ТО АФАР РЛС за наробітком з адитивним контролем показників надійності до вироблення ресурсу (терміну служби). На рис. 7.2 представлений алгоритм реалізації стратегії експлуатації і ТО АФАР РЛС до перед відмовного стану з адитивним контролем показників надійності.

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 замін модулів антенних підрешіток у процесі експлуатації.

У табл. 7.2 приведений докладний опис усіх операцій, що реалізуються алгоритмом ТО АФАР.

У представленому на рис. 7.1 і рис. 7.2 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 замін модулів антенної решітки.

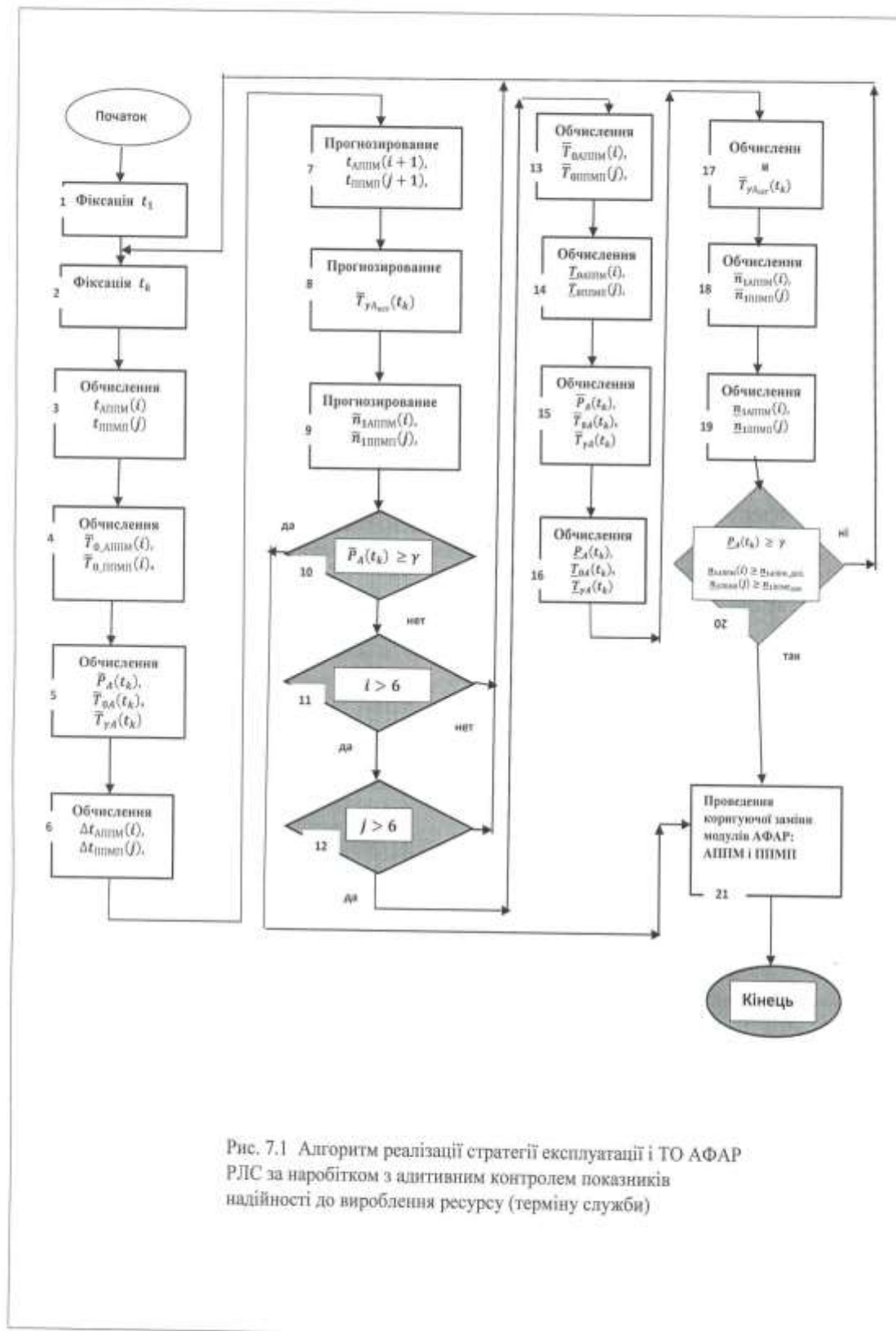


Рис. 7.1 Алгоритм реалізації стратегії експлуатації і ТО АФАР РЛС за наробітком з адитивним контролем показників надійності до вироблення ресурсу (терміну служби)

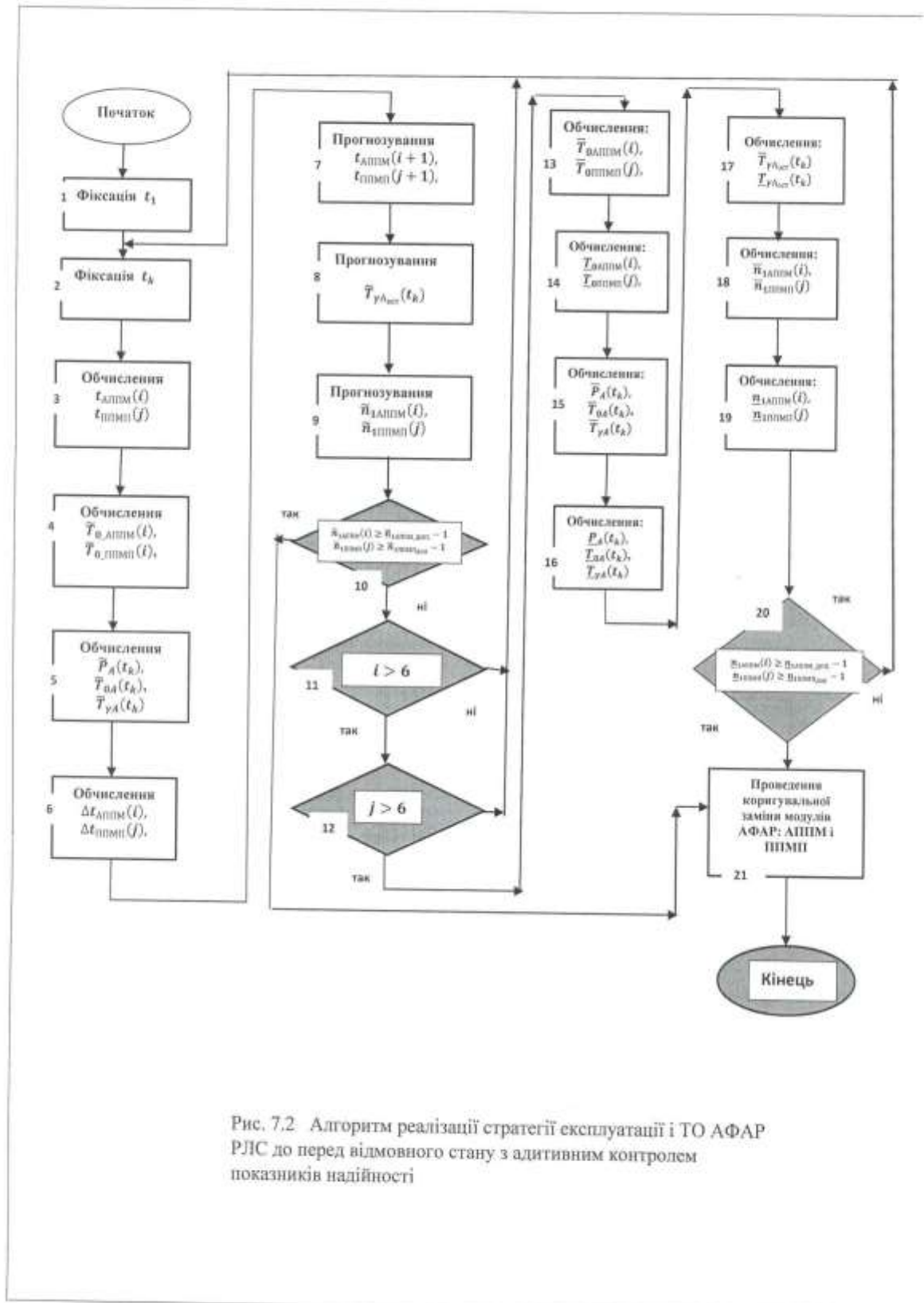


Рис. 7.2 Алгоритм реалізації стратегії експлуатації і ТО АФАР РЛС до перед відмовного стану з адитивним контролем показників надійності

Таблиця 7.3

**Характеристика операцій, представлених в алгоритмах ТО АФАР за
наробітком до вироблення ресурсу і до передвідмовного стану з
адитивним контролем показників надійності**

Номер операції	Назва операції	Характеристика операцій	Примітка
1	2	3	4
1	Фіксація t_0	Фіксування ВСКК загального наробітка АФАР до моменту включення РЛС	----
2	Фіксація t_k	Фіксування ВСКК моменту настання k -ї відмови модуля АФАР будь-якого типу	$k = i + j$
3	Обчислення $t_{\text{АППМ}}(i)$, $t_{\text{ППМП}}(j)$	Класифікація відмов за типами модулів АФАР: АППМ, ППМП	$k = i + j$
4	Обчислення $\tilde{T}_{0\text{АППМ}}(i)$, $\tilde{T}_{0\text{ППМП}}(j)$	Визначення оцінки вибіркового середнього показників безвідмовності модулів АФАР: АППМ, ППМП	Метод квантилів, дивись розділ 6.4.4
5	Обчислення $\tilde{P}_A(t_k)$, $\tilde{T}_{0A}(t_k)$, $\tilde{T}_{\gamma A}(t_k)$	Визначення оцінки вибіркової середньої імовірності безвідмовної роботи, середнього наробітку до відмови і гамма-відсоткового ресурсу АФАР	Дивись розділ 6.4.5

Продовження таблиці 7.3

1	2	3	4
6	Обчислення $\tilde{\Delta}t_{\text{АПММ}}(i)$, $\tilde{\Delta}t_{\text{ППММ}}(j)$	АФАР: АПММ, ППММ	$\tilde{\Delta}t_{\text{АПММ}}(i) = (t_i - t_0)/i$, $\tilde{\Delta}t_{\text{ППММ}}(j) = (t_j - t_0)/j$,
7	Прогнозування $t_{\text{АПММ}}(i + 1)$, $t_{\text{ППММ}}(j + 1)$	Прогнозування моментів часу настання наступних відмов модулів підретітки АФАР: АПММ і ППММ	$t_{\text{АПММ}}(i + 1) = t_i + \tilde{\Delta}t_{\text{АПММ}}(i)$, $t_{\text{ППММ}}(j + 1) = t_j + \tilde{\Delta}t_{\text{ППММ}}(j)$,
8	Прогнозування $\tilde{T}_{\text{Гост-А}}(t_k)$	Прогнозування вибіркового середнього залишкового гамма-відсоткового ресурсу АФАР	$\tilde{T}_{\text{Гост-А}}(t_k) = \tilde{T}_{\gamma\text{А}}(t_k) - t_k$
9	Прогнозування $\tilde{n}_{1\text{АПММ}}(i)$, $\tilde{n}_{1\text{ППММ}}(j)$	Прогнозування вибірових значень кількості коригувальних замін модулів антенної решітки	Розділ 6.4.5
10 (2)	Друга стратегія експлуатації і ТО за наробітком до вироблення ресурсу: Рішення порівняння: $\tilde{P}_A(t_k) > \gamma$	Порівняння імовірностей $-\tilde{P}_A(t_k)$ і γ : - якщо $\tilde{P}_A(t_k) \leq \gamma$ тоді виконується коригувальна заміна модулів АФАР (перехід до операції 21); - якщо $\tilde{P}_A(t_k) > \gamma$, тоді продовжується набір статистики про відмови модулів за нормальної експлуатації АФАР РЛС (перехід до операції 11)	Розділи 6.4.4 і 6.4.5

Продовження таблиці 7.3

10 (4)	<p>Четверта стратегія експлуатації і ТО за предвидмовним станом:</p> <p>Рішення порівнянь:</p> $\tilde{n}_{1\text{АППМ}}(i) \geq \tilde{n}_{1\text{АППМ_доп}} - 1$ $\tilde{n}_{1\text{ППМП}}(j) \geq \tilde{n}_{1\text{ППМП_доп}} - 1$	<p>Порівняння нижньої довірчої межі допустимої кількості, зменшеної на одиницю, і необхідної кількості коригувальних замін модулів антенної решітки. якщо</p> $\tilde{n}_{1\text{АППМ}}(i) \geq \tilde{n}_{1\text{АППМ_доп}} - 1$ $\tilde{n}_{1\text{ППМП}}(j) \geq \tilde{n}_{1\text{ППМП_доп}} - 1$ <p>тоді проводиться коригувальна заміна модулів АФАР (перехід до операції 21). Якщо</p> $\tilde{n}_{1\text{АППМ}}(i) < \tilde{n}_{1\text{АППМ_доп}} - 1$ $\tilde{n}_{1\text{ППМП}}(j) < \tilde{n}_{1\text{ППМП_доп}} - 1$ <p>тоді продовжується набір статистики про відмови модулів за нормальної експлуатації АФАР РЛС (перехід до операції 2)</p>	Розділ 6.4.5
11	<p>Рішення:</p> <p>порівняння</p> $i > 6$	<p>Порівняння номера відмови модуля АППМ - i з числом 6 (шість):</p> <ul style="list-style-type: none"> - якщо $i \leq 6$, тоді переходимо до виконання операції 2; - якщо $i > 6$, тоді переходимо до виконання операції 14 	- - - -
12	<p>Обчислення:</p> $\bar{T}_{0\text{АППМ}}(i),$ $\bar{T}_{0\text{ППМП}}(j)$	<p>Обчислення верхніх довірчих меж середнього наробітку до відмови модулів АФАР: АППМ, ППМП</p>	Розділ 6.4.4

Продовження таблиці 7.3

1	2	3	4
14	Обчислення: $\underline{T}_{0\text{АППМ}}(i),$ $\underline{T}_{0\text{ППМП}}(j),$	Обчислення нижніх довірчих меж середнього наробітку до відмови модулів підрешітки АФАР: АППМ, ППМП	Розділ 6.4.4
15	Обчислення: $\bar{P}_A(t_k),$ $\bar{T}_{0A}(t_k),$ $\bar{T}_{\gamma A}(t_k)$	Обчислення верхніх довірчих меж імовірності безвідмовної роботи, середнього наробітку до відмови і гамма-відсоткового ресурсу АФАР	Розділи 6.4.4, 6.4.5
16	Обчислення: $\underline{P}_A(t_k),$ $\underline{T}_{0A}(t_k),$ $\underline{T}_{\gamma A}(t_k)$	Обчислення нижніх довірчих меж імовірності безвідмовної роботи, середнього наробітку до відмови і гамма-відсоткового ресурсу АФАР	Розділи 6.4.4, 6.4.5
17	Обчислення: $\bar{T}_{\gamma A_{\text{ост.}}}(t_k),$ $\underline{T}_{\gamma A_{\text{ост.}}}(t_k)$	Визначення верхніх і нижніх довірчих меж залишкового гамма-відсоткового ресурсу АФАР	Розділи 6.4.4, 6.4.5

Продовження таблиці 7.3

1	2	3	4
18	Прогнозування $\bar{n}_{1\text{АППМ}}(i)$, $\bar{n}_{1\text{ППМП}}(j)$	Прогнозування значень верхньої оцінки кількості коригувальних замін модулів антенної решітки	Розділ 6.4.5
19	Прогнозування $\underline{n}_{1\text{АППМ}}(i)$, $\underline{n}_{1\text{ППМП}}(j)$	Прогнозування значень нижньої оцінки кількості коригувальних замін модулів антенної решітки	Розділ 6.4.5
20 (2)	Друга стратегія експлуатації і ТО за наробітком до вироблення ресурсу: Рішення за результатами порівняння: $\underline{P}_A(t_k) > \gamma$	Порівняння нижніх довірчих меж імовірності безвідмовної роботи $\underline{P}_A(t_k)$ і γ : якщо $\underline{P}_A(t_k) \leq \gamma$ тоді проводиться коригувальна заміна модулів АФАР (перехід до операції 21); - якщо $\underline{P}_A(t_k) \leq \gamma$, тоді триває набір статистики про відмови модулів при нормальній експлуатації АФАР РЛС (перехід до операції 2)	Розділи 6.4.4 и 6.4.5

Завершення таблиці 7.3

1	2	3	4
20 (4)	<p>Четверта стратегія експлуатації і ТО за передвідмовним станом:</p> <p>Рішення за результатами порівняння:</p> $\underline{n}_{1\text{АПМ}}(i) \geq \underline{n}_{1\text{АПМ}}_{\text{доп}} - 1$ $\underline{n}_{1\text{ППМ}}(j) \geq \underline{n}_{1\text{ППМ}}_{\text{доп}} - 1$	<p>Якщо</p> $\underline{n}_{1\text{АПМ}}(i) \geq \underline{n}_{1\text{АПМ}}_{\text{доп}} - 1$ $\underline{n}_{1\text{ППМ}}(j) \geq \underline{n}_{1\text{ППМ}}_{\text{доп}} - 1 ,$ <p>тоді проводиться коригувальна заміна модулів АФАР (перехід до операції 21).</p> <p>Якщо</p> $\underline{n}_{1\text{АПМ}}(i) < \underline{n}_{1\text{АПМ}}_{\text{доп}} - 1$ $\underline{n}_{1\text{ППМ}}(j) < \underline{n}_{1\text{ППМ}}_{\text{доп}} - 1 ,$ <p>то продовжується набір статистики про відмови модулів за нормальною експлуатацією АФАР РЛС (перехід до операції 2)</p>	Розділи 6.4.4 и 6.4.5
21	Проведення коригувальної заміни модулів	Проведення коригувальної заміни модулів АФАР: АПМ, ППМ	---

7.6 Реалізація другої стратегії експлуатації і технічного обслуговування за станом з адитивним контролем показників надійності на прикладі передавальної активної фазованої антенної решітки

Приклад 7.1

Вихідні дані прикладу 7.1 представлені у табл. 7.4

Таблиця 7.4

Вихідні дані прикладу 7.1

Вихідні дані		Результати обчислень	
Кількість передавальних модулів в передавальній ФАР	100	Середній час наробітку до відмови АФАР	5826 год.
Середній наробіток до відмови передавального модуля	50000 год.	Гамма-відсотковий ресурс (за $\gamma = 0,90$) АФАР	3698 год.
Інтенсивність відмов передавального модуля	0,0002 1/год.	Кількість модулів, які підлягають заміні при коригувальній заміні	7,0 (6,35)
Допустимий рівень зниження імовірності безвідмовної роботи АФАР	0,900		

Реалізація алгоритму експлуатації ТО передавальної АФАР за наробітком з адитивним контролем показників надійності до вироблення ресурсу представлені у табл. 7.5 (вихідні дані) і табл. 6.9 (результати обчислень).

Таблиця 7.5

Дані щодо відмов АППМ передавальної АФАР

Номер відмов передавальних модулів	1	2	3	4	5	6
Момент часу виявлення відмови передавального модуля, год.	347	763	1375	1890	2487	3113
Номер відмов передавальних модулів	7	8	9	10	11	12
Момент часу виявлення відмови передавального модуля, год.	3397	3835	4417	4875	5372	3969

У табл. 6.8 представлені вихідні дані щодо 12 відмов передавальних модулів передавальної АФАР, що включає 100 АППМ (дозволена відмова 10 модулів). Значення моментів часу відмов передавальних модулів отримані з таблиці рівномірно розподілених випадкових чисел [189], які перетворені в таблицю випадкових моментів часу відмови модулів АППМ, що розподілені за експоненціальним законом (перші 12 чисел) з інтенсивністю відмов – $\lambda_{\text{мод.}}=0,00002$ 1/год.

У табл. 7.6 представлені обчислення значень вибіркового середнього для:

- імовірності безвідмовної роботи АФАР – $P(t_i)$;
- середнього наробітку до відмови передавальних модулів і передавальної АФАР - $T_{0_мод}(sr)$ і $T_{0_АФАР}(sr)$;
- гамма-відсоткового ресурсу АФАР – $T_{\gamma_АФАР}(sr)$;

Таблиця 7.6

Результати рішення прикладу 7.1

Алгоритм ТО АФАР за станом	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$
1	2	3	4	5	6
i	1	2	3	4	5
t_i	347	763	1375	1890	2487
$\frac{i}{100}$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
$\frac{t_i}{m_i}$	0,01005	0,020202	0,030454	0,04082	0,051295
$T_{0_мод}(sr)$	34626	36196	39170	40958	42464
$P(t_i)$	0,9999999	0,99999	0,9993	0,9945	0,973
$T_{0_АФАР}(sr)$	4035	4218	4564	4773	4948
Порівняння: $P(t_i) \geq \gamma$	0,99999>0,90	0,99999> 0,900	0,9993> 0,900	0,9945> 0,900	0,973> 0,900
Перехід до коригувальної заміни	НІ	НІ	НІ	НІ	ТАК
Алгоритм ТО АФАР	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$
i	6	7	8	9	10
t_i	3113	3397	3835	4417	4875
$\frac{t_i}{100}$	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1

Завершення таблиці 7.6

1	2	3	4	5	6
$\frac{t_i}{m_i}$	0,06187	0,07258	0,08338	0,09431	0,10536
$T_{0_мод}(sr)$	43772	44205	44429	44697	44854
$P(t_i)$	0,9182	0,879	0,796	0,660	0,544
$T_{0_АФАР}(sr)$	5101	5151	5177	5209	5227
$T_{\gamma_АФАР}(sr)$	3240	3270			
Порівняння: $P(t_i) \geq \gamma$	0,918 > 0,90	0,879 < 0,90	0,796 < 0,90	0,66 < 0,90	0,54 < 0,90
Перехід до коригувальної заміни	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК
Алгоритм ТО АФАР	$i=11$	$i=12$			
i	11	12			
t_i	5372	5969			
$\frac{t_i}{100}$	0,11	0,12			
$\frac{t_i}{m_i}$	0,116533	0,127833			
$T_{0_мод}(sr)$	32221	32982			
$P(t_i)$	0,420	0,292			
$T_{0_АФАР}(sr)$	5240	5257			
$T_{\gamma_АФАР}(sr)$		3334			
Порівняння: $P(t_i) \geq \gamma$	0,42 < 0,900	0,292 < 0,90			
Перехід до коригувальної заміни	ТАК	ТАК			

Основні результати реалізації алгоритму ТО АФАР за станом отримані після відмови 7-го передавального модуля, коли прийнято рішення про проведення коригувальної заміни модулів, що відмовили:

Середній наробіток АФАР після 7-ї відмови передавального модуля –
 $T_{0_АФАР}(7) = 3334$ год.

Гамма-відсотковий ресурс АФАР після 7-ї відмови передавального модуля
 $T_{\gamma_АФАР}(7) = 3334$ год.

Кількість передавальних модулів, які підлягають заміні при коригувальній заміні $n_1 = 7$.

7.7 Висновки до сьомого розділу

1. Представлені практичні рекомендації щодо вдосконалення вимог для забезпечення високої надійності, ефективності експлуатації і ТО АФАР РЛС.

2. Вперше розроблена методика визначення вимог до показників надійності приймально-передавальних каналів АФАР РЛС з урахуванням критерія допустимого зниження максимальної дальності радіолокатора і критерія допустимого погіршення РБП.

3. Удосконалено методику визначення необхідної кількості запасних частин в частині обліку різних законів розподілу відмов каналів і модулів АФАР. Показано, що потрібна кількість запасних каналів і модулів є однаковим для всіх типів закону розподілу відмов.

4. Значення середнього наробітку до відмови і гамма-відсотковий ресурс АФАР визначаються видом закону розподілу відмов каналів і модулів антенної решітки. Найменші значення характерні під час раптових відмов (ER) і максимальні значення характерні під час поступових відмов каналів і модулів АФАР.

5. Вперше розроблені рекомендації щодо забезпечення експлуатації АФАР РЛС на стадії гарантійного та післягарантійного обслуговування з

використанням моделей оптимального ТО і реалізації алгоритмів експлуатації і ТО за фактичним станом.

6. Реалізація розроблених алгоритмів експлуатації і ТО дозволяють забезпечувати надійну (безперервну) роботу АФАР РЛС за рахунок контролю фактичного технічного стану антенної решітки і своєчасного проведення профілактичних заміन каналів і модулів.

Список використанням наукових робіт здобувача в розділі 7.

1. 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**)

2. 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. 36 – 46.*

3. Костановский В.В., Мачалин И.А. Разработка и исследование универсальной модели надежности активной фазированной антенной решетки РЛС. *Збірник наукових праць «Водний транспорт», ДУІТ. 2020, вып. №1 (29). С. 31- 45*

4. 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.*

5. 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.*

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

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

8. Стандарт підприємства. СТП ФИЯЕ.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.

9. Стандарт підприємства. СТП ФИЯЕ.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.

10. Пояснювальна записка до технічного проекту 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

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 однорівневої, 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азарсков В.Н., Стрельников В.П. Надежность систем управления и автоматики: [Текст]: / Учебное пособие. Киев: НАУ, 2004 г. 164 с.
2. Акиншин Р.Н., Быстров Р.П., Кузнецов Е.В., Михайлов Д.Ю., Соколов А.В., Чесноков Ю.С. Развитие радиоэлектронной техники радиолокационных систем. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2005, № 10, С. 24- 58.
3. Антошина В.М., Якимов В.Л. Описание статистики отказов конструктивных элементов многофункциональных радиолокационных станций по экспериментальным данным. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2018. Вып. 12. С. 396 – 404.
4. Афанасьев В.Г., Зеленцов В.А., Миронов А.Н. Методы анализа надежности и критичности отказов сложных систем, М.: Мин-во обороны, 1992, 100 с.
5. Богомья В. И. Анализ некоторых эксплуатационных свойств современных крупнотоннажных судов, методов и систем их обеспечения при плавании в стеснённых условиях / В. И. Богомья, В. С. Давыдов, Р. В. Кожухаренко // Водный транспорт. 2014 № 3 (21). С. 23–31.
6. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1982. 231 с.
7. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. М.: "Советское радио", 1971. 271 с.
8. Барлоу Р.Е., Прошан Ф. Математическая теория надежности. Пер с англ. Под ред. Б.В. Гнеденко. М.: "Советское радио", 1969. 488 с.
9. Вопросы математической теории надежности / под ред. Б.В. Гнеденко. М.: Радио и Связь, 1983. 376 с.
10. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. М.: Наука, 1984. 268 с.

11. Беляев Ю.К. Линейчатые марковские процессы и их приложение к задачам теории надежности. *Тр. VI Всесоюзного совещания по теории вероятностей и математической статистике. Вильнюс, 1962.* 168 с.
12. Берс Л., Джон Ф., Шехтер М. Уравнения с частными производными. М.: Мир, 1966. 345 с.
13. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. М.: Сов.радио, 1973. 235 с.
14. Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем.-М.:Наука,1977. 268 с.
15. Банзак Г.В. Математическая модель адаптивного технического обслуживания по состоянию [Текст]: / *Материали VI всеукраїнської науково-практичної конференції за міжнародної участю, м. Полтава: 19–21 березня 2015 року.* С. 155 – 165.
16. Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию (элементы теории) [Текст]: / - М. : Транспорт, 1981. 198 с.
17. Белотуров В., Иванов Д., Кривченко И. - Построение источников питания на базе модулей компании Visor. *Компоненты и технологии.* № 12, 2011. С. 67 – 75.
18. Быстров Р.П., Канн Е.В., Садыков Р.Р., Фролов С.С. Анализ современных методов военной радиолокации и обоснование направлений их дальнейшего развития. *Вопросы оборонной техники*, 2005, сер.16, вып. 3-4, С. 6-11.
19. Быстров Р.П., Кузнецов Е.В., Соколов А.В. Функциональные устройства и элементная база радиотехнических устройств. *Вооружение. Политика. Конверсия*, 2004, № 6, - С.30-35.
20. Быстров Р.П., Соколов А.В., Чесноков Ю.С. Методы современной военной радиолокации. *Вооружение. Политика. Конверсия*, 2004, № 5, С. 36-40.

21. Быкадоров А.К., Кульбак Л.И., Лавриненко В.Ю., Рысейкин И.Л. , Тихомиров В.Н. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры. Изд. «Высшая школа», Москва, 1968 г., 319 с.
22. Викулов И. Радиоэлектронные системы с АФАР: направления развития и применения. *Электроника. Наука, технология, бизнес.* №5 (00165) 2017, с. 126 – 134.
23. Викулов И.-Технологическая база GaN СВЧ-микрорелектроники: Компании, процессы, Возможности. *Электроника, наука | технология | бизнес.* №1 (00161), 2017. С. 25 - 45 .
24. Воробьев С. Выбор элементной базы для систем вторичного электропитания приемопередающих модулей АФАР. Компоненты и технологии , № 10, 2014. С. 36 -40.
25. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. М. Изд. «Сов. Радио», 1966 г. 165 с.
26. Гермейер Ю.Б. Методологические и математические основы исследования операций и теории игр. *Вып. 1-5. Изд. МГУ, 1967.* 256 с.
27. Гихман И.И., Скороход А.В. Теория случайных процессов. М.: Наука, 1973. т. 2. 639 с.
28. Гнеденко И.Б., Беляев Ю.К., Соколов А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
29. Гнеденко Б.В.Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. М.: Наука, 1966. 235 с.
30. Горский Л.К. Статистические алгоритмы исследования надежности. М.: Наука, 1970. 342 с.
31. Губанов В.А, Захаров В.В., Коваленко А.Н. Введение в системный анализ. Л.: ЛГУ, 1988. 355 с.
32. Гуров С.В., Анализ надежности технических устройств с произвольными законами распределения, *Сб. «Повышение надежности*

промышленных изделий в свете решений съезда КПСС». Л. : ДЦНТП, 1981. 234 с.

33. Гуров С.В. Математическое описание стационарного режима функционирования и оценка показателей надежности технических устройств с произвольными законами распределения, *Сб.научн. трудов*. Л.:ЛИАП, 1985. С. 45 – 67.

34. Гуров С.В. , Джерихов В.В. О надежности технических систем при наличии многофазных переходов. Задачи исследования и обеспечения надежности ЭВМ, Минск, БЕЛНИИИТИ,1985. 215 с.

35. Гуров С.В. , Интегральный метод анализа надежности технических систем с произвольными законами распределения, Задачи исследования и обеспечения надежности ЭВМ, Минск, БЕЛНИИИТИ,1985. 145 с.

36. Гуров С.В. , Хабаров С.П. , Влияние дисциплины восстановления на показатели надежности технических систем при произвольных законах распределения. *Сб. «Повышение качества и надежности промышленных изделий»*. Л.: ЛДНТП, 1985. 178 с.

37. Гуров С.В. , Хабаров С.П. Оценка надежности восстанавливаемых систем последовательно-параллельной структуры с произвольными законами распределения. *Изв.ВУЗов, Приборостроение*, 1. Т.XXXI, N 12, 1988. С. 35 – 45.

38. Гуров С.В. , Хабаров С.П. Оценка эффективности судовых технических систем при многофазных режимах функционирования. *Материалы ВНТК "Проблемы комплексной автоматизации судовых техн. средств"*. Л., 1989. С. 68 -83.

39. Гуров С.В. , Хабаров С.П. Оценка надежности контролируемых технических устройств при произвольных законах распределения параметров контроля и восстановления. *Сб. «Повышение качества и надежности технических изделий»*. Л.: ДЦНТП, 1989. 368 с.

40. Гришаков М.Н. Анализ отказов и разработка технических мероприятий по повышению надежности СВЧ твердотельных модулей для радиолокационных станций. *Тема, диссертация и автореферат по ВАК РФ (05.27.01, кандидат технических наук Гришаков, Михаил Николаевич)*

41. Гуров С.В., Анализ надежности технических систем с произвольными законами распределений отказов и восстановлений. *Качество и надежность изделий, N2 (18), М.: Знание, 1992. 256 с.*

42. Гуров С.В. , Оценка на персональной ЭВМ надежности технических систем с произвольными распределениями их отказов и ремонтов. *"Надежность, живучесть и безопасность технических систем", I-ая Межгосударственная конференция.-С.-Пб., 1992. 245 с.*

43. Гончаров А. AEPS GROUP Матричные системы электропитания – новый этап развития технологий АФАР. *Современная электроника, № 6, 2015 г. 67 с.*

44. Горлов, М. И. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий / М. И. Горлов, В. А. Сергеев; под науч. ред. М. И. Горлова. 2-е изд. – Ульяновск : Ул.ГТУ, 2015. 406 с.

45. Гриб Д.А. Удосконалення методів технічної експлуатації і ремонту як основа підтримання боєготового стану зенітного ракетного озброєння в сучасних умовах / Д.А. Гриб, Б.М. Ланецький, В.В. Лук'янчук. *Наука і оборона. 2012. № 3. С.55 – 63.*

46. Демьянчук В.С. Надежность систем управления воздушным движением. Киев: Вища школа, 1979. 150 с.

47. Дзиркал Э.В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий. «Сов. радио», 1981, 176 с.

48. Дзиркал Э.В. Надежность сложных систем. Курс лекций (опорный конспект). *Библиотека инженера по надежности. 2012 г. 117 с.*

49. Дедков В.К. Северцев Н.А. Основные вопросы эксплуатации сложных систем. «Высшая школа», 1976, 406 с.

50. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. Энергоатомиздат. 1978, 480 с.
51. Дружинин Г.В. Процессы технического обслуживания автоматизированных систем. «Энергия», М, 1971, 272 с.
52. Додонов А.Г., Путятин В.Г., 2018 3 ISSN 1028-9763. Математичні машини і системи, 2018, № 1, С. 1-30.
53. Далецкий С.В. Проектирование систем технического обслуживания и ремонта воздушных судов гражданской авиации / С.В. Далецкий. М.: МАИ, 2001. 230 с.
54. Дудник, П. И. Многофункциональные радиолокационные системы : учеб. пособие для вузов / П.И. Дудник, А.Р. Ильчук, Б.Г. Татарский; под ред. Б.Г. Татарского. М. : Дрофа, 2007. 283 с.
55. Жуков Л.Ф, Корниенко А.Л., Богдан А.В., Крупник В.М., Крупник Л.В., Писаренко В. Г, Костановский В. В. Инновационные технологии многоцветовой термометрии / *Науковий журнал «Вимірювання техніка та метрологія»*. 2012. Вип. 73. С. 45-51.
56. Жуков Л. Ф. , Корниенко А. Л. , Богдан А. В., Крупник В. М., Крупник Л.В., Писаренко В.Г., Костановский В.В. Новые технологии многоцветового бесконтактного и световодного термоконтроля металлических сплавов / *Науковий журнал «Металл и литье Украины»* 2012. № 9. С. 29-34.
57. Зельдович Я.В. Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. «Наука», 1968, 648 с.
58. Збырко М.Д., Кузнецов В.Н., Турбин А.Ф. О полумарковской модели для анализа надежности систем с восстанавливаемой защитой. *Автоматика и телемеханика*, 1980, №6, С. 175-185.
59. Зеленцов В.А., Гагин А.А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи, М. : Мин-во обороны, 1991. 169 с.

60. Золотарев В.М. Метрические расстояния в пространствах случайных величин и их распределений. *Математ. сб. 101 (143), вып.3, М.:Наука, 1976,* - С. 416-454.

61. Зубова А.Ф. О холодном резервировании с восстановлением. *Автоматика и телемеханика. №10, 1965.* - С. 45-54.

62. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания. М.: Высшая школа, 1982. 235 с.

63. Ицкович А.А., Смирнов Н.Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию [Текст]: / М.: Транспорт, 1987. 272 с.

64. Игнатов В. А., Маньшин Г.Г., Трайнев В.А. Статистическая оптимизация качества функционирования электронных систем: [Текст]: / Москва: «Энергия», 1974 г. 268 с.

65. Козлов Б., Ушаков И. Справочник по расчету надежности. М.: Советское радио, 1975. 471 с.

66. Кокс Д.Р., Смит В.Л. Теория восстановления. Пер. с англ. М.: Советское радио, 1976. 299 с.

67. Колемаев В.А., Калинина В.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник / Под ред. В.А. Колемаева. М.: (Серия "Высшее образование"). Инфра -М, 1997. 302 с.

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

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

69. 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, Р. 20-31. (Журнал включено до НМБД SCOPUS)*

70. Kostanovskyi 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**)

71. 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.

72. Костановський В.В. Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, які враховують раптови 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.

73. 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

74. 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.

75. 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.

76. 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.

77. 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.

78. 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.

79. 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.

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

81. Костановський В.В. Математична модель оптимізації профілактичного обслуговування передавальних активних фазованих антенних решіток багатофункціональної РЛС. *Збірник наукових праць «Новітні технології»*. 2020, Випуск 1(11). С. 4-13.

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

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

84. Костановский В.В., Козачук О.Д., Мачалин И.А. Математическая модель надежности приемо-передающей АФАР в приемном режиме по критерию допустимого ухудшения уровня боковых лепестков. *Науковий журнал «Наукоємні технології», НАУ, 2020, №3. С. 276-286.*

85. Костановский В.В., Мачалин И.А. Разработка и исследование универсальной модели надежности активной фазированной антенной решетки РЛС. *Збірник наукових праць «Водний транспорт». ДУІТ. 2020, вып. №1 (29). С. 31- 45.*

86. Костановський В.В., Мачалін І.О., Козачук О.Д. Взаємозв'язок стратегій експлуатації та технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій. *Науковий журнал «Радіотехніка», м. Харків. 2020, №4, С. 36 – 46.*

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

89. Костановский В.В., Баглай Г.Р. Планирование отработки 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.*

90. 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 ОВТ ЗСУ, м. Київ. С. 153-154.*

91. 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 ОВТ ЗСУ, м. Київ. С. 228-229.*

92. Костановский 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.*

93. 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 и перспективи», НТУ «Київський політехнічний інститут». Приладобудівний факультет, 23-24 квітня 2013 р., м. Київ, Україна, С. 63-64.*

94. 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.*

95. Козачук О.Д., Костановський В.В. Особенности применения зарубежных справочников при оценке надежности электрорадиоэлементов в процессе разработки авиационной радиоэлектронной аппаратуры. *Матеріали*

Міжнародної наукової конференції 16 -17 жовтня 2013 року «Статистичні методи обробки сигналів і даних», НАУ. Інститут аеронавігації, 2013. С. 128 – 131.

96. 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/ATM». Державне космічне агентство України, Укр. Аеро. Рух., НАУ, Інститут аеронавігації. С. 63-69.*

97. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. М.: Издательство стандартов, 1989. 224 с.

98. Кузнецов Е.С. Исследование эксплуатационной надежности автомобилей. М.: Транспорт, 1963 г. 153 с.

99. Кузнецов Е.С. Направления научно-технического прогресса и перспективы развития технической эксплуатации автомобилей: *Учебное пособие. МАДИ. М. :1987. 90 с.*

100. Кузнецов Е.С. Режимы технического обслуживания автомобилей. М.: Автотрансиздат. 1963г. 155 с.

101. Кузнецов Е.С. Техническое обслуживание и надежность автомобилей. М.: Транспорт, 1972. 222 с.

102. Кузнецов Е.С. Управление технической эксплуатацией автомобилей. М.: Транспорт, 1982. 224 с.

103. Кузнецов Е.С. Управление технической эксплуатацией автомобилей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1990. 272 с.

104. Кирилюк А.С. Модели для розрахунку показників залишкового ресурсу функціональних систем радіоелектронних засобів ЗРК за параметром технічного стану при відомій моделі його [Текст]: / *Системи озброєння і військова техніка. Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків. 2008, № 3(15).*

105. Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Жерновенков В.А. Перспективный многофункциональный приемопередающий модуль АФАР X-диапазона. *Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника*. 2017. Выпуск 1 (532). С. 45-48.
106. Коняхин И.А. Методы и средства статистического моделирования ОЭС (анализ надежности) / Учебное пособие. СПб: ИТМО, 2005. 50 с.
107. Корляков Вадим «Приоритеты радиолокации» [Текст]: / *Журнал «Воздушно-космическая оборона»* Выпуск №2 от 23 марта 2007 г. С. 1-13.
108. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. «Наука», М. 1973 г., 832 с.
109. Каштанов В. А. Оптимальные задачи технического обслуживания. М.: Знание, 1981, 50 с.
110. Коваленко И.Н. Асимптотический метод анализа надежности сложных систем. В кн.: О надежности сложных технических систем. М.: Сов. радио, 1967. 125 с.
111. Коваленко И.Н. Исследование по анализу надежности сложных систем. Киев: Наук.думка, 1975. 209 с.
112. Коваленко И.Н. Аналитико-статистический метод расчета характеристик высоко ответственных систем. *Кибернетика*, №6, 1976. С. 56 - 66.
113. Коваленко И.Н. Анализ редких событий при оценке эффективности и надежности систем. М.: Сов.радио, 1980. 208 с.
114. Коваленко И.Н., Кузнецов Н.Ю. Построение вложенного процесса восстановления для существенно многомерных процессов теории массового обслуживания и его применение к получению предельных теорем: *Препринт 80.12*. Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1980. 61 с.
115. Коваленко И.Н., Кузнецов Н.Ю. Методы расчета высоконадежных систем. М., Радио и связь, 1988, 234 с.

116. Каштанов В. А. Оптимальные задачи технического обслуживания. М.: Знание, 1981, 50 с.
117. Коваленко И.Н. Асимптотический метод анализа надежности сложных систем. В кн.: О надежности сложных технических систем. М.: Сов. радио, 1967. 245 с.
118. Коваленко И.Н. Исследование по анализу надежности сложных систем. Киев: Наук.думка, 1975. 321 с.
119. Коваленко И.Н. Анализ редких событий при оценке эффективности и надежности систем. М.: Сов.радио, 1980. 208 с.
120. Коваленко И.Н., Кузнецов Н.Ю. Построение вложенного процесса восстановления для существенно многомерных процессов теории массового обслуживания и его применение к получению предельных теорем: *Препринт 80.12. Киев: Ин-т кибернетики АН УССР*, 1980. 61 с.
121. Коваленко И.Н., Кузнецов Н.Ю. Методы расчета высоко надежных систем. М., Радио и связь, 1988. 234 с.
122. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.:Сов.радио, 1975. 472 с.
123. Кокс Д., Смит В. Теория восстановления. М.,Сов.радио, 1967. 420 с.
124. Колганов С.К., Корников В.В., Попов П.Г., Хованов Н.В. Построение в условиях дефицита информации сводных оценок сложных систем. М.:Радио и связь, 1994. 80 с.
125. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. Киев: Наук.думка, 1976. 182 с.
126. Королюк В.С., Лебединцева Е.П. Предельная теорема для времени пребывания полумарковского процесса в подмножестве состояний. *Укр. мат. журн.*, 1978, 30 К5. С. 671-674.
127. Кузнецов В.Н. О полумарковской модели для нагруженного дублирования. *Кибернетика*, 1980, "JV4, С. 91-98.

128. Кузнецов В.Н., Турбин А.Ф., Цатурян Г.Ж., Полумарковские модели восстанавливаемых систем: *Препринт 81.11. Киев: Ин-т математики АН УССР*. 1981. 44 с.

129. Курсакина З.Н., Шевчук С.А., Муромский А.В. Результаты исследования закона распределения времени между отказами аппаратуры ЭВМ третьего поколения, 1988. 78 с.

130. Ланецкий Б.Н., Модель оценивания стоимости эксплуатации сложных технических систем по техническому состоянию. Общие положения / -Б.Н. Ланецкий, В.В. Лукьянчук, Н.И. Кириллова, А.А. Артеменко - *Озброєння і військова техніка*. 2013. № 1 (33). С. 87 – 90.

131. Ланецкий Б.Н., Лукьянчук В.В., Кириллова Н.И., Артеменко А.А. - Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков.-Модель оценивания стоимости эксплуатации сложных технических систем по состоянию. Основные расчетные соотношения. *Системи озброєння і військова техніка*. 2013, № 4(36). С. 82-86

132. Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем. Учебное пособие. «Сов. радио», 1978 г. 264 с.

133. Ленков С.В., А.В. Селюков, В.В. Зубарев, В.Н. Цыцарев. Определение оптимальных параметров технического обслуживания по состоянию сложных объектов радиоэлектронной техники. [Текст]: / *Інформатика та математичні методи в моделюванні*, Київ: 2013, Том 3, № 3. С. 543 – 549.

134. Ленков Е.С. , Жиров Г.Б. , Бондаренко Т.В. Формализованная математическая модель процесса адаптивного технического обслуживания по состоянию сложной радиоэлектронной техники [Текст]: / *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2016, Том 6, №4. С. 365-371.

135. Лисицын А.А., Алексеенков В.И., Василевский В.А., Далингер А.Г., Калашников Ю.Н., Манченко Л.В., Пчелин В.А., Семенюк С.С., Сучкова

Е.В., Сытилин С.Н., Шалин Т.И. АО «НПП «Исток» им. Шокина». Приемопередающие модули АФАР Ки диапазона частот. 145 с.

136. 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.

137. Машков О.А, Мамчур Ю.В. Формалізація задачі підготовки на тренажері оператора керування безпілотним летальним апаратом екологічного моніторингу на основі вирішення зворотних задач динаміки. Новітні технології. Університет новітніх технології випуск 2(6), 2018. С. 24 – 30.

138. Ненартович Н.Э., Митяшев М.Б., Из практики разработки АФАР *Вестник концерна ПВО Алмаз-Антей*, №3, 2014. С. 1-23.

139. Опенько П.В., Кобзев В.В., Фоменко Д.В. Обоснование применения группового учета аргументов для прогнозирования долговечности радиоэлектронных средств зенитных ракетных комплексов при реализации стратегии технической эксплуатации и ремонта по техническому состоянию [Текст]: / *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки, Науково-практичний журнал, Національний університет оборони України Інститут інформаційних технологій*. 2012, №1 С. 52-59.

140. Орловский М. Н., Акименко К. Ю., Онищенко А. П. Внедрение принципа упреждающего технического обслуживания воздушных судов [Текст]: / *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, Харьков: 2014. № 64. С. 45-56.*

141. Павлов С., Филиппов А. Антенные фазированные решетки. Обзор компонентной базы для реализации приемопередающих модулей // *Компоненты и технологии: № 7, 2014. С. 57 – 62.*

142. Пак Я., Стрелецкий А. Развитие систем ПВО-ПРО боевых кораблей ВМС США [Текст]: / *М. Зарубежное военное обозрение. 2017, №5. С. 66-75*

143. Песоцкий В.М., Кузнецов В.Н., Левинский Б.Г. Оценка надежности функционирования АСУ ТП при воздействии импульсных помех, *Электронное моделирование*, №1, 1981. С. 45-62.
144. Прошан Ф., Цатурян Г.Г. Многозначные монотонные системы. *Надежность и контроль качества*, 6-16 (1990). С. 67 – 76.
145. Прытков С. Ф. Надежность ЭРИ: Справочник / С. Ф. Прытков, В. М. Горбачева, А. А. Борисов и др. М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2006. 674 с.
146. Петрашевский О.Л. Экологические аспекты эффективности авиационного транспорта. *Проблеми транспорту. Збірник наукових праць. Випуск 9. К. НТУ*. 2012. С. 294 – 296.
147. Пиза Д.М., Д.С. Семенов Д.С., Бугрова Т.И. Проектирование радиолокационных систем. МОН Украины. Запорожский национальный технический университет. Электронное издание комбинированного использования на DVD-ROM Запорожье 2017. 135 с.
148. Резиновский А.Я. Испытания на надежность радиоэлектронных комплексов. М. «Радио и связь», 1985 . 168 с.
149. Рябинин И.А., Киреев Ю.Н. Надежность судовых электроэнергетических систем и судового электрооборудования. «Судостроение», Ленинград, 1974. 264 с.
150. Райкин А. Л. Вероятностные модели функционирования резервированных устройств. М.: Наука, 1971. 234 с.
151. Райкин А.Л. Элементы теории надежности технических систем. / Под ред. И.А.Ушакова. М.: Сов. радио, 1978. 145 с.
152. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. 367 с.
153. Решетов Д.Н. и др. Надежность машин. М.: Высшая школа. 457 с.
154. Романовский И.В. Алгоритмы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1977. 352 с.

155. Рябинин И.А., Рубинович В.Д. О влиянии типа законов распределения времени исправной работы и времени восстановления на характеристики надежности резервированной системы. *В кн.: Теория надежности и массовое обслуживание. М.: Наука, 1969. С.46-54.*
156. Севастьянов Б.А. Эргодическая теорема для марковских процессов и ее приложение к телефонным системам с отказами. *Теория вероятностей и ее применения, 1957, т. 11, №1. С. 106-116.*
157. Седякин Н.М. Об одном физическом принципе надежности. *Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1966, № 2. С. 80-87.*
158. Соловьев А.Д. Резервирование с быстрым восстановлением. *Изв. АН СССР. Сер. "Техн. кибернетика», 1970. С. 56-70.*
159. Соловьев А.Д. Основы математической теории надежности. *В кн.: Материалы лекций, прочитанных в Политехническом музее на семинаре по надежности и прогрессивным методам контроля качества продукции. Вып. 1. М.: Знание, 1975. 64 с.*
160. Соломенцев О.В. та ін. Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронних засобів: Конспект лекцій. Кривий Ріг: ППТ, 2008. 110 с.
161. Садыхов, Г. С. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко, Н. И. Сидняев. Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 382 с.
162. Смирнов, Н. Н. Система технической эксплуатации летательных аппаратов: состояние и проблемы / *Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. Безопасность полетов: Вестник МГТУ ГА, М. : 2002.– №49. С. 7–12.*
163. Смирнов Н.Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / Н.Н. Смирнов, А.А. Ицкович, М.: Транспорт, 1987. 272 с.
164. Суранов А.А., профессор, д.т.н. Ниеталин Ж.Н., Джаманшалов М.У. Исследование активных фазированных антенных решёток. *Изд.*

Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева. Республика Казахстан. 2012 г. С. 1-6.

165. Черкесов Г. Н. Надежность технических систем с временной избыточностью. «Сов. радио», 1974. 296 с.

166. Черкесов Г. Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП : учебное пособие / Г. Н. Черкесов. СПб. : БХВ-Петербург, 2012. 478 с.

167. Широков А.М. Надежность радиоэлектронных устройств. – М. Высшая школа, 1972. 271 с.

168. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. /Перевод с английского под редакцией А.И.Синани. Цикл «Мир радиоэлектроники». изд. «Техносфера», Москва, 2012 г.. 559 с.

169. Уланский В. В. Математическая модель процесса эксплуатации легкозаменяемых блоков систем авионики / В. В. Уланский, И. А. Мачалин. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2006. № 6(32). С. 74–80.

170. Уланский В. В. Оценка эксплуатационной надежности периодически контролируемой одноблочной системы авионики при наличии явных и скрытых отказов / В. В. Уланский, И. А. Мачалин. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2007, № 6 (42). С. 87–93.

171. Уланский В.В. Организация системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного комплекса Ту–204: Учебное пособие. / В. В. Уланский, Г. Ф. Конахович, И. А. Мачалин, К.: КИИГА, 1992. 103 с.

172. Ушаков И. А. Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем. М.: Радио и связь, 1988. 252 с.

173. Ушаков И. А. Эвристический метод оптимизации резервирования многофункциональных систем. *Изв. АН СССР. Сер. "Техн.кибернетика"*, N4, 1972.. С. 56-67.

174. Математическая теория надежности систем массового обслуживания. /Под ред.проф. В.И.Зубова М.- Л.: Энергия, 1966. 265 с.

175. Техническая эксплуатация летательных аппаратов состоянию/

Под ред. Смирнова Н.Н. [Текст]: / М.: Транспорт. 1990. 423 с.

176. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток.- Учебное пособие. – Под редакцией Д.И. Воскресенского, М. изд. «Радио и связь», 1994 г. 592 с.

177. Радиолокационные станции разведки наземных движущихся целей. Современный уровень и основные направления развития © Н. А. Зайцев, А. В. Платов, В. А. Потапов, 2014. *Вестник концерна ПВО Алмаз-Антей*, №1, 2014. С. 56-67.

178. Справочник. Надежность технических систем / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин [и др.] ; под редакцией И. А. Ушакова. М. : Радио и связь, 1985. 606 с.

179. Единый справочник “Надежность электрорадиоизделий», Минобороны СССР, ЦНИИ “Электронстандарт”, редакция 1990 г. 345 с.

180. ДСТУ 3372–96 Система технічного обслуговування та ремонту авіаційної техніки. Організація гарантійного обслуговування авіаційної техніки. Основні положення : ДСТУ 3372–96 / [В. В. Уланський, І. О. Мачалін (наук. керівники), Г.Ф. Конахович та ін.]– [Чинний від 1997–01–01]. К. : Держспоживстандарт України 1997. 132 с.

181. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги, Держстандарт України, Київ, [Чинний від 01.01.97]. 17 с.

182. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Держстандарт України. Київ, [дії з 01.01.1997]. 32 с.

183. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд. стандартов, 1990. 37 с.

184. ГОСТ 18.322. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Изд. Стандартов, 1985. 25 с.

185. ГОСТ 19490-74. Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Формы учета результатов обработки эксплуатационной информации. Изд. Стандартов, 1975. 56 с.

186. ГОСТ 27.411-81. Надежность в технике. Одноступенчатые планы контроля по альтернативному признаку при распределении времени безотказной работы по закону Вейбулла. Изд. Стандартов. 1980. 45 с.

187 . ГОСТ 27.503-90. Надежность в технике. Система сбора и обработки. Изд. Стандартов. 1990. 34 с.

188 . ДСТУ 2860-94 Надежность техники. Термины и определения. Действует с. 01.01.1996, Держстандарт України [Чинний від 1996.01.01]. 35 с.

189. ГОСТ Р 50779.27-2017 (МЭК 61649:2008) Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. Изд. Стандартов. 2017, 45 с.

190. ГОСТ 27.301-95 Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Основные положения. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. г. Минск. Изд. Стандартов. 1995. 35 с.

191. ГОСТ 27.103-83 Надежность в технике. Критерии отказов и предельных состояний. Основные положения. Изд. Стандартов. 1983. 24 с.

192. ГОСТ 15.016-2016. Система разработки и постановки на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. Межгосударственный стандарт. Принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 25 октября 2016 г. N 92-П), Дата введения 2017-09-01. 25 с.

193. ГОСТ 34.602-89. Техническое задание на создание автоматизированной системы. Межгосударственный стандарт. Переиздание июнь 2009 г., Принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 25 октября 2016 г. N 92-П). 34 с.

194. Стандарт підприємства. СТП ФИЯЕ.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.

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

196. Стандарт підприємства. СТП ФИЯЕ.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.

197. Стандарт підприємства. СТП ФИЯЕ.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.

198. Пояснювальна записка до технічного проекту РЛС «Фенікс», у рамках ДКР «Простір-Ф» ДП «НДІ «Квант», номер державної реєстрації РК0108U000066Т, 2012 р. - Головний конструктор Демченко О.В.

199. 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.

200. 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.

201. 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.

202. 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.

203. MIL-HDBK-217F, 2 December 1991, Reliability prediction of electronic equipment with / MIL-HDBK-217F, NOTICE 2, 28 February 1995, USA 465 с.

204. IEC TR 62380 Ed.1. Справочные данные по надежности - Универсальная модель для расчета надежности электронных компонентов, печатных плат и оборудования”. Редакция 2004 г. (“Reliability Data Handbook - Universal model for reliability prediction of Electronics components, PCBs and equipment”). 186 с.

205. IEC 61709 Electric components – Reliability – Reference conditions for failure rates and stress models for conversion, 2010. 125 с.

206. MIL-H-38534 Hybrid Microcircuits, General Specification for, USA. 415 с.

207. MIL-STD-883 Test Methods and Procedures for Microelectronics, USA. 255 с.
208. Опытный зенитно-ракетный комплекс MEADS, Ракетная техника: [Электроний ресурс] / в разделе 7 7.1 Kahrilas P.J. Elektronik Scanning Radar System Design Handbook. // <http://www.rbase.new-factoria.ru/missile/wobb/meads/meads.shtml> (дата звернення: 22.05.2020). Назва з екрану.
209. Зенитно-ракетная система С-300В / С-300ВМ Антей-2500, Ракетная техника, // <http://www.rbase.new-factoria.ru/missile/wobb/c300v/c300v.shtml> (дата звернення: 22.05.2020). Назва з екрану.
210. Современная система ПВО и ПРО морского базирования на основе фрегатов: [Электроний ресурс] / Состояние в разных странах мира // <http://www.integral-russia.ru/2020/05/21/sovremennaya-sistema-pvo-i-pro-morskogo-bazirovaniya-na-osnove-fregatov-sostoyanie-v-raznyh-stranah-mira/#content> (дата звернення: 12.05.2020). Назва з екрану.
211. Многофункциональная РЛС с активной фазированной антенной решеткой PHENIX:[Электроний ресурс] / ГП «НИИ «Квант», Киев <https://www.bm-oplot.livejournal.com/7218.html> /// (дата звернення: 12.04.2020). Назва з екрану.
212. Зенитный ракетный комплекс "Patriot", Вестник ПВО: [Электроний ресурс] / <http://www.pvo.guns.ru/other/usa/patriot/index.htm> // (дата звернення: 12.01.2020). Назва з екрану.
213. Зенитный ракетный комплекс Patriot PAC-3, Ракетная техника: [Электроний ресурс] / <http://www.rbase.new-factoria.ru/missile/wobb/erint/erint.shtml> // (дата звернення: 12.05.2020). Назва з екрану.
214. Зенитно-ракетная система С-300 ПМУ-2 'Фаворит', Ракетная техника: [Электроний ресурс] / <http://www.rbase.new-factoria.ru/missile/wobb/c300v/c300v.shtml> // (дата звернення: 12.03.2020). Назва з екрану.

215. Зенитная ракетная система большой и средней дальности С-400 «Триумф»: [Электронный ресурс] / Продукция Концерна «Алмаз – Антей»: ЗРС С-400, Новости ВПК: [http: www.ВПК.name](http://www.ВПК.name) /// (дата звернення: 12.03.2019). Назва з екрану.

216. Система ракетной обороны ТНААД :[Электронный ресурс]/ Army news – 2015 – 02. <http://www/army-news.ru> - idzhis-s-zapada-i-thaad-s-vostoka // (дата звернення: 12.03.2019). Назва з екрану.

217. Многофункциональная радиолокационная станция AN/TPS-80 Ground: /Air Task-Oriented Radar, <http://nevskii-bastion.ru/antps-80-gator-usa> <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/02.surv/karte017.ru.html> //(дата звернення: 12.03.2019). Назва з екрану.

218. Ashok K. Agrawal, Bruce A. Kopp, Mark H. Luesse, and Kenneth W. O’Haver - Active Phased Array Antenna Development for Modern Shipboard Radar Systems - JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST, VOLUME 22, NUMBER 4 (2001) . P. 45-58.

219. Ashok K. Agrawal and Eric L. Holzman, Beamformer Architectures for Active Phased-Array Radar Antennas / IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 47, NO. 3, MARCH 1999 – P. 67-78.

220. *Strelnikov V.* The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 1 // RAC Journal. 2001. № 1. P. 1–4.

221. *Strelnikov V.* The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 2 // RAC Journal. 2001. № 2. P. 8–10.

222. 2000 IEEE International Conference of Phased Array Systems and Technology Proceedings / IEEE Catalog Number^))TH8510 // ISBN^ 0-7803-63-0 /// Library of Congress : 00-01681///// 2000 by the Institute of Electrical Engineers, Inc. – IEEE Operations Center.

223. Dimitri B. Kececioglu (2003) Maintainability, Availability and Operational Readiness Engineering Handbook, Volume 1.

224. Dimitri B. Kececioglu (2002) Reliability Engineering Handbook,

Volume 1 / - Publisher: DEStech Publications, Inc.; Revised edition (May 15, 2002)
Language: English - ISBN-10: 1932078010 - ISBN-13: 978-1932078015.

225. Dimitri B. Kececioglu (2002) Reliability Engineering Handbook, Volume 2 / Published by DEStech Publications, Inc, United States (2002). ISBN 10: 1932078010 ISBN 13: 9781932078015. New Hardcover Quantity Available:

226. Nakagawa Toshio (2008) Advanced reliability models and maintenance policies. Springer, London.

227. Syouji Nakamura, Toshio Nakagawa (2010) Stochastic Reliability Modeling, Optimization and Applications / Kinjo Gakuin University, Japan// Aichi Institute of Technology, Japan / - World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224 // USA office 27 Warren Street, Suite 401-402, Hackensack, NJ 07601.

228. Toshio Nakagawa (2011) Stochastic Processes with Applications to Reliability Theory / Springer Series in Reliability Engineering // Dr. Toshio Nakagawa Department of Business Administration Aichi Institute of Technology /// - 1247 Yachigusa, Yakusa-cho 470-0392 Toyota Japan //// ISSN 1614-7839, ISBN 978-0-85729-273-5.

229. Joel A. Nachlas (2016) Reliability Engineering: Probabilistic Models and Maintenance Methods, Second Edition / - 2016 -December -1 by CRC Press Pages - 148 - B/W Illustrations // ISBN 9781498752473.

230. The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability / A Report of the IEEE/PES Task Force on Impact of Maintenance Strategy on Reliability of the Reliability, Risk and Probability Applications Subcommittee. J. Endrenyi, S. Aboresheid, R. N. Allan, G. J. Anders, S. Asgarpoor, R. Billinton, N. Chowdhury, E. N. Dialynas, M. Fipper, R. H. Fletcher, C. Grigg, J. McCalley, S. Meliopoulos, T. C. Mielnik, P. Nitu, N. Rau, N. D. Reppen, L. Salvaderi, A. Schneider, and Ch. Singh // IEEE transaction on power systems /// 2001. November. No. 4. Vol. 16.

231. The present status of maintenance strategies and the impact of

maintenance on reliability / IEEE Transactions on Power Systems:// – 2001. Nov. Vol. 16 Page(s) C. 638 – 646.

232. Kossi Tiassou, Karama Kanoun, Mohamed Kaaniche, Christel Seguin, Chris Papadopoulos . Modeling Aircrafts Operational Reliability [Текст]: / [Электронный ресурс] - HAL Id: hal-01176051, Submitted on 5 Oct. 2015-<https://www.hal.archives-ouvertes.fr/hal-0117605> // (дата звернення: 12.05.2020). Назва з екрану.

233. Min Wang, Jiang-ping Yang, Yong-pan Wang, Wei-jian Liu - Maintenance Optimization Model for One kind of Three-Dimensional Radar Antenna Array [Текст]: [Электронный ресурс] / International Conference on Artificial Intelligence Applications and Technologies (AIAAT 2017) - 2017 - Vol 261 -30 August to 2 September 2017, Hawaii, USA, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China. - <http://www.iopscience.iop.org/journal/1757-899X> // (дата звернення: 12.05.2020). Назва з екрану.

234. The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability A Report of the IEEE/PES Task Force on Impact of Maintenance Strategy on Reliability of the Reliability, Risk and Probability Applications Subcommittee, J. Endrenyi, S. Aboresheid, R. N. Allan, G. J. Anders, S. Asgarpoor, R. Billinton, N. Chowdhury, E. N. Dialynas, M. Fipper, R. H. Fletcher, C. Grigg, J. McCalley, S. Meliopoulos, T. C. Mielnik, P. Nitu, N. Rau, N. D. Reppen, L. Salvaderi, A. Schneider, and Ch. Singh - IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 16, NO. 4, NOVEMBER, 2001. P. 89 -96.

235. Syouji Nakamura Kinjo Gakuin University, Japan Toshio Nakagawa Aichi Institute of Technology, Japan : Stochastic Reliability Modeling, Optimization and Applications / Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224. 309 p.

236. Kodo Ito, Toshio Nakagawa - COMPARISON OF CYCLIC AND DELAYED MAINTENANCES FOR A PHASED ARRAY RADAR - Journal of the Operations Research Society of Japan 2004, Vol. 47, No. 1. P. 51-61.

237. The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability A Report of the IEEE/PES Task Force on Impact of Maintenance Strategy on Reliability of the Reliability, Risk and Probability Applications Subcommittee, J. Endrenyi, S. Aboresheid, R. N. Allan, G. J. Anders, S. Asgarpoor, R. Billinton, N. Chowdhury, E. N. Dialynas, M. Fipper, R. H. Fletcher, C. Grigg, J. McCalley, S. Meliopoulos, T. C. Mielnik, P. Nitu, N. Rau, N. D. Reppen, L. Salvaderi, A. Schneider, and Ch. Singh, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 16, NO. 4, NOVEMBER, 2001. 467 p.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті в закордонних наукових журналах

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

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

Статті у наукових фахових виданнях

2. 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. Р. 32-38 (Журнал включено до НМБД **SCOPUS**)

3. Kostanovskyi 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. Р. 31-40. (Журнал включено до НМБД **SCOPUS**)

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Костановський В.В. Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, які враховують раптови 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.

8. 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

9. 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.

10. Костановський 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.

11. Костановський 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

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

18. 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.

19. 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.

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

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

22. Жуков Л. Ф. , Корниенко А. Л. , Богдан А. В., Крупник В. М., Крупник Л.В., Писаренко В.Г., Костановский В.В. Новые технологии многоцветового бесконтактного и световодного термоконтроля металлических сплавов / *Науковий журнал «Металл и литье Украины»* 2012. № 9. С. 29-35.

23. Костановський В.В., Математична модель оптимізації профілактичного обслуговування передавальних активних фазованих антенних решіток багатофункціональної РЛС. *Збірник наукових праць «Новітні технології»*. 2020, Випуск 1(11). С. 4-13.

Матеріали конференцій

24. Костановский В.В., Баглай Г.Р. Планирование отработки 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.

25. 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 ОВТ ЗСУ, м. Київ*. С. 153-154.

26. 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 ОВТ ЗСУ, м. Київ.* С. 228-229.

27. 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.

28. 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 и перспективи», НТУ «Київський політехнічний інститут». Приладобудівний факультет, 23-24 квітня 2013 р., м. Київ, Україна.* С. 63-64.

29. 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.

30. 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.

31. 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/ATM»*, Державне космічне агентство України, Укр. Аеро. Рух., НАУ, Інститут аеронавігації. С. 63- 68.

Стандарти

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

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

34. 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.

35. 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 проектів

36. Пояснювальна записка до технічного проекту 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.

37. 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.

38. 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.

39. 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.

40. 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.

ДОДАТОК Б
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник директора
ДП «НДІ «КВАНТ»
з наукової роботи,
канд. техн. наук

В.Т. Стефанович

« 19 » 06 2019р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ наукових результатів

Ми, що нижче підписалися, представники ДП «НДІ «КВАНТ»:
начальник СКБ-6 М.О. Живописцев, начальник відділу 30 О.В. Демченко,
в.о.вченого секретаря Русняк І.М. та виконавець, канд. техн. наук, начальник науково-
дослідного відділу надійності та стандартизації (НДВНС) В.В. Костановський склали
дійсний акт у тому, що начальник НДВНС В.В.Костановський приймав участь у ДКР
«Простір-Ф» та виконані ним дослідження, методики та програмне забезпечення
використовувались:

- у «Технічному проекті на розробку РЛС «Простір-Ф»»;
- ФІЯЕ. 461321.004, номер державної реєстрації РК0108U000066Т.

Впроваджені наукові результати та досягнутий фактичний ефект представлені в таблиці.

Таблиця

Найменування впровадженого результату НДР (прилад, технологічний процес, речовина, метод, методика, рекомендації, ДСТ, технологічні вимоги та ін.)	Досягнутий фактичний ефект (соціальний, технічний, організаційний та ін.)
1. Математичні моделі розрахунку показників надійності фазованих антенних решіток РЛС	Підтвердження характеристик системи вимогам Технічного завдання
2. Програмне забезпечення розрахунку показників надійності фазованих антенних решіток РЛС	

Представники ДП «НДІ «КВАНТ»

Начальник СКБ-6
М.О. Живописцев *[підпис]*

Начальник відділу 30, канд. техн. наук
О.В. Демченко *[підпис]*

В.О. вченого секретаря, головний
науковий співробітник, канд. техн. наук
І.М. Русняк *[підпис]*

Виконавець

Начальник НДВНС
ДП «НДІ «КВАНТ»,
канд. техн. наук
В.В. Костановський *[підпис]*

ЗАТВЕРДЖУЮ


 Головний інженер,
 канд. техн. наук
 ДП «НДІ «Квант-Радіолокація»
 В.П. Липатов

09 2019р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ наукових результатів

Ми, що нижче підписалися, представники ДП «НДІ «КВАНТ-РАДІОЛОКАЦІЯ»: заступник директора Я.М. Піронер, заступник головного інженера О.А. Евстратенко, начальник відділу, канд. техн. наук А.В. Бутирин та виконавець, канд. техн. наук, начальник науково-дослідного відділу надійності та стандартизації (НДВНС) ДП «НДІ «КВАНТ»

В.В. Костановський склали дійсний акт у тому, що начальник НДВНС В.В. Костановський приймав участь у розробці Ескізного проекту «Передвижного радіолокационного поста (ППП) многофункциональной станции сопровождения и наведения (МССН) ЗРК», шифр «Атлант» та виконані ним дослідження, методики та програмне забезпечення використовувалися:

- у «Передвижном радиолокационном посту МССН ЗРК МД» (малой дальности)», шифр «Атлант-М»; десятичний номер ZRS KRL ANL 001 06, Замовник «КБ «Южное»;


- у «Передвижном радиолокационном посту МССН ЗРК СД» (средней дальности)»; шифр «Атлант-С»; десятичний номер ZRS KRL ANL 001 07, Замовник «КБ «Южное».

Впроваджені наукові результати та досягнутий фактичний ефект представлені в таблиці.


Таблиця

Найменування впровадженого результату НДР (прилад, технологічний процес, речовина, метод, методика, рекомендації, ДСТ, технологічні вимоги та ін.)	Досягнутий фактичний ефект (соціальний, технічний, організаційний та ін.)
<p>1. Математичні моделі розрахунку показників надійності фазованих антенних решіток ПРП МССН ЗРК</p> <p>2. Математичні моделі розрахунку показників технічного обслуговування фазованих антенних решіток ПРП МССН ЗРК</p> <p>3. Програмне забезпечення розрахунку показників надійності фазованих антенних решіток ПРП МССН ЗРК</p>	<p>1. Підтвердження характеристик ПРП вимогам Технічного завдання</p> <p>2. Визначення показників надійності та технічного обслуговування фазованих антенних решіток ПРП МССН ЗРК</p> <p>3. Визначення потрібної кількості випромінюючих приймально-передавальних модулів для технічного обслуговування фазованих антенних решіток ПРП МССН ЗРК</p>


**Представники
ДП «НДІ «КВАНТ-
РАДІОЛОКАЦІЯ»**

Заступник директора
Я.М. Піронер 

Заступник головного інженера
О.А. Евстратенко 

Начальник відділу
А.В. Бутирин 

Виконавець:

Начальник сектору НДВНС
ДП «НДІ «КВАНТ»,
О.Д. Козачук 

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник директора

ДП «НДІ «КВАНТ»

з наукової роботи,

канд. техн. наук

В.Т. Стефанович

« 23 » 04 2019 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ наукових результатів

Ми, що нижче підписалися, представники ДП «НДІ «КВАНТ»:


начальник СКБ-6 М.О. Живописцев, начальник відділу 30 О.В. Демченко, в.о.вченого секретаря Русняк І.М. та виконавець, канд. техн. наук, начальник науково-дослідного відділу надійності та стандартизації (НДВНС) ДП «НДІ «КВАНТ» В.В. Костановський склали дійсний акт у тому, що начальник НДВНС В.В.Костановський приймав участь у «Концептуальному проекті багатофункціональної станції супроводження й наведення (МССН) ЗРК» та виконані ним дослідження, методики та програмне забезпечення використовувалися:

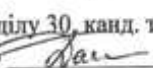
- у «Концептуальному проекті на розробку МССН-МД (малої дальності) ЗРК»;
децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206; Замовник КБ «Южное»;
- у «Концептуальному проекті на розробку МССН-СД (середньої дальності) ЗРК»;
децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206; Замовник КБ «Южное».

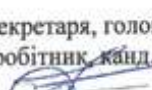
Впроваджені наукові результати та досягнутий фактичний ефект представлені у таблиці
Таблиця

Найменування впровадженого результату НДР (прилад, технологічний процес, речовина, метод, методика, рекомендації, ДСТ, технологічні вимоги та ін.)	Досягнутий фактичний ефект (соціальний, технічний, організаційний та ін.)
1. Математичні моделі розрахунку показників надійності фазованих антенних решіток РЛС МССН 2. Програмне забезпечення розрахунку показників надійності фазованих антенних решіток РЛС МССН	1. Підтвердження характеристик МССН вимогам Технічного завдання 2. Розрахунок показників надійності фазованих антенних решіток РЛС МССН

Представники ДП «НДІ «КВАНТ»

Начальник СКБ-6
М.О. Живописцев 

Начальник відділу 30, канд. техн. наук
О.В. Демченко 

В.О. вченого секретаря, головний науковий співробітник, канд. техн. наук
І.М. Русняк 

Виконавець

Начальник НДВНС,
ДП «НДІ «КВАНТ»
канд. техн. наук
В.В. Костановський 