

Національний авіаційний університет  
Міністерство освіти і науки України

Національний авіаційний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Козачук Оксана Дмитрівна**

УДК 629.735.083.02/06(042/3)

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

### **Математичні моделі оцінки надійності радіоелектронних систем**

05.22.20 - експлуатація та ремонт засобів транспорту

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

Науковий керівник Костановський Валерій Вікторович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Київ – 2021

## АНОТАЦІЯ

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

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

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання. Яке полягає у розробленні нових математичних моделей оцінки надійності радіоелектронних систем (на прикладі активних фазованих антенних решіток) з урахуванням особливостей їх використання в складних умовах експлуатації.

У дисертаційній роботі представлена коротка характеристика радіоелектронних систем з активними фазованими антенними решітками (АФАР), аналіз методів відмов і моделей надійності електрорадіовиробів та методи оцінки показників надійності радіоелектронних систем, які проектуються.

Були розроблені математичні моделі апроксимації інтенсивностей раптових і поступових відмов електрорадіовиробів з використанням експоненціального розподілу, дифузійного немонотонного розподілу, розподілу Вейбулла і композиції розподілів.

Окрім цього у роботі були виконані дослідження впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності резервованих радіоелектронних систем з дробовою кратністю, розроблені математичні моделі оцінки надійності активної фазованої антенної підрешітки і АФАР за різними законами розподілу відмов приймально-передавальних каналів. Розроблена математична модель оцінки надійності АФАР радіоелектронних систем, що враховує зміну температури активної зони кристала GaN транзисторів і мікросхем випромінюючих каналів.

Окремий розділ присвячено розробленню практичних рекомендацій щодо розрахунку надійності радіоелектронних систем з АФАР.

Доопрацьований та дістав подальшого розвитку метод розроблення вимог до показників надійності каналів та модулів АФАР радіоелектронних систем.

Новизна роботи полягає у наступному. Вперше були розроблені математичний метод та моделі апроксимації інтенсивностей раптових і поступових відмов радіоелектронних елементів, які відрізняються від існуючих впровадженням експоненціального і дифузійного немонотонного розподілу та композиції розподілів відмов і можуть бути використані у процесі проектування та розроблення каналів і модулів АФАР.

Вперше розроблено математичні моделі оцінки надійності АФАР з однорівневою та дворівневою структурними схемами надійності, які дозволяють отримувати оцінки надійності приймально-передавальних радіолокаційних станцій з АФАР.

Крім того, розроблені та досліджені моделі надійності АФАР за різними розподілами відмов приймально-передавальних каналів (ППК), що характеризують прояв раптових і поступових відмов. Дослідження показали, що використання композиції розподілів для відмов ППК під час розрахунку середнього наробітку до відмови АФАР дозволяє отримати вигоду у розмірі від 40% до 90% у порівнянні з використанням експоненціального розподілу відмов.

У роботі вперше розроблені метод та математична модель оцінки надійності АФАР в залежності від температури активної зони кристалів GaN (нітрид галієвих) мікромодулів, що дозволяють вибрати оптимальну структуру системи рідинного охолодження;

Здобувачкою був удосконалений метод визначення вимог до показників надійності каналів і модулів АФАР, який дозволяє зменшити витрати на проектування радіолокаційних станцій.

Підтвердженням достовірності наукових досліджень є збіг результатів теоретичних та експериментальних досліджень, а також успішна реалізація результатів роботи на промислових підприємствах України.

Практичне значення одержаних результатів ґрунтується на тому що, широке використання розроблених моделей буде сприяти підвищенню надійності в процесі створення радіоелектронних систем з АФАР.

*Ключові слова:* імовірність безвідмовної роботи, розподіл відмов, електрорадіовироби, інтенсивність відмов, радіоелектронна система, надійність, математична модель.

### Список публікацій здобувача

#### *Статті у наукових фахових виданнях*

1. Kostanovsky V., Kozachuk O., Rusniak I. Development of the algorithm of reliability centered maintenance of phased array antennas. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 1/9. P. 32-38. (Журнал включено до НМБД **SCOPUS**)
2. Kostanovskyi V., Machalin I., Kozachuk O., Terentyeva I. Construction of a generalized probabilistic – physical model of reliability of two-level active a phased antenna array. *Eastern - Europe an journal of enterprise technologies*. 2019. 3/9 (99). P. 31-40. (Журнал включено до НМБД **SCOPUS**)
3. Козачук О.Д. Дослідження впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності резервованих систем з дробовою кратністю. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем, НАН України «Математичні машини і системи»*. 2015 р. №1. С. 171-177.
4. Костановський В.В., Козачук О.Д. Математичні моделі прогнозування показників безвідмовності та довговічності електрорадіовиробів на основі статистичних даних про відмови. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем. НАН України «Математичні машини і системи»*. 2015. №2. С. 157-169.
5. Костановский В.В., Козачук О.Д. Вероятностный анализ безотказности и долговечности апертур фазированных антенных решеток в процессе проектирования, *Науковий журнал Інституту проблем*

математичних машин і систем НАН України «Математичні машини і системи», 2015, №3, С. 201-212.

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

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

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

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

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

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

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

*Матеріали конференцій*

13 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.*

14 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.*

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

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

17 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 авіонавігації, 2013. С. 128 – 131.*

18 Козачук О.Д. Оценка надежности импортной элементной базы в процессе разработки авиационной радиоэлектронной аппаратуры НАУ - *«Проблеми навігації і управління рухом» Всеукр. наук.-практ. конф., 18-20 листопада 2013 р.: тези доп. НАУ. 2013. С103.*

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

#### ANNOTATION

*Kozachuk O.D. Mathematical models for assessing the reliability of electronic systems - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.*

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.22.20 "Operation and repair of means of transport". - National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of actual scientific research of developments of new mathematical models of an estimation of reliability of radio electronic systems (on the applied phased antennas decisive) depending on features of manufacture in warehouse conditions.

The dissertation presents a brief description of radio electronic systems with active phased array antennas (APAA), analyzes the methods and models of reliability of electrical products and methods for evaluating the evaluation of indicative system-electronic electronics.

Mathematical models of approximation of intensity of rape incomes of failures of electroradio products with use of exponential distribution, diffusion nonmonotonic compound, distribution of delicacy were developed.

Performance research of efficiency indicators on indicators of reliability of reserves of the transferred radio electronic systems with fractional short statistics, development of mathematical models of decisions of reliability by active phases of antenna-pizza channels. The mathematical model of an estimation of reliability of APAA of radio electronic systems is developed, for the considered change of temperature of an active zone of a crystal of GaN of transistors and chips of radiating channels.

A separate section is devoted to the development of practical recommendations for calculating the reliability of electronic systems with APAA. The method of development of requirements for indicators of reliability of channels and modules of APAA of radio electronic systems is improved.

The novelty of the work is as follows. For the first time, a mathematical method and models for approximating the intensities of sudden and gradual failures of electronic elements were developed, which differ from the existing ones by introducing exponential and diffusion nonmonotonic distribution and composition of failure distributions and can be used in designing and developing APAA channels and modules;

For the first time, mathematical models for assessing the reliability of APAA with one-level and two-level structural schemes of reliability, which allow to obtain reliability estimates of receiving and transmitting radar stations with AFAR;

In addition, models of APAA reliability have been developed and studied for different distribution distributions of transceiver channels (PPCs), which characterize the manifestation of sudden and gradual failures. Studies have shown that the use of the distribution composition for PPC failures when calculating the average operating time before the failure of APAA allows you to get a gain of 40% to 90% compared with the use of exponential failure distribution;



For the first time, a method and a mathematical model for estimating the reliability of APAA depending on the core temperature of GaN (gallium nitride) crystals of micromodules were developed, which allow to choose the optimal structure of the liquid cooling system;

The applicant has improved the method of determining the requirements for the reliability of APAA channels and modules, which reduces the cost of designing radar stations.

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 practical significance of the obtained results. Extensive use of the developed models will increase reliability in the process of creating electronic systems with APAA.

*Keywords:* probability of failure-free operation, failure distribution, electrical and radio products, failure rate, electronic system, reliability, mathematical model.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	14
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1 КОРотКА ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНУ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	23
1.1 Коротка характеристика РЛС з АФАР	23
1.2 Аналіз моделей відмов та моделей надійності електрорадіовиробів	24
1.2.1 Основні поняття і визначення моделей відмов та моделей надійності	24
1.2.2 Види відмов	26
1.2.3 Імовірнісні моделі надійності	27
1.2.4 Імовірнісно-фізичні моделі надійності	33
1.2.5 Розподіл, який описує накладення декількох причин відмов	34
1.2.6 Порівняльний аналіз моделей відмов елементів	35
1.3 Недоліки експоненціального розподілу відмов при прогнозуванні надійності радіоелектронних елементів	36
1.4 Застосування імовірнісно-фізичних моделей оцінки надійності радіоелектронних систем	37
1.5 Аналіз відмов передавальних модулів високої частоти АФАР за експериментальними даними	38
1.6 Оцінка показників надійності проєктованих РС	39
1.7 Оцінка показників надійності РС типу АФАР	40
Висновки до першого розділу	41
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ АПРОКСИМАЦІЇ КРИВИХ ІНТЕНСИВНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОРАДІОВИРОБІВ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬСЯ ПРОЯВОМ РАПТОВИХ І	43

## ПОСТУПОВИХ ВІДМОВ

2.1	Постановка завдань	43
2.2	Дослідження типової кривої інтенсивності відмов ЕРВ	43
2.2.1	Загальні положення	43
2.2.2	Типова крива інтенсивності відмо ЕРВ	45
2.2.3	Характеристика статистичної інформації про відмови ЕРВ, яка представлена в довідниках щодо надійності	46
2.2.4	Побудова математичних моделей апроксимації інтенсивностей відмов ЕРВ з використанням різних імовірнісних розподілів	48
2.3	Розроблення математичної моделі апроксимації кривої інтенсивності поступових відмов ЕРВ на основі дифузійного немонотонного розподілу	49
2.3.1	Математична модель апроксимації кривої інтенсивності поступових відмов ЕРВ, що використовує «спрощений» дифузійний немонотонний розподіл	49
2.3.2	Математична модель апроксимації кривої інтенсивності поступових відмов ЕРВ, яка використовує «повний» дифузійний немонотонний розподіл	51
2.4	Розроблення математичної моделі апроксимації кривої інтенсивності відмов ЕРВ, які характеризуються спільним проявом раптових і поступових відмов	56
2.4.1	Математична модель апроксимації на основі комбінації двох розподілів: експоненціального і дифузійного немонотонного	56
2.4.2	Математична модель апроксимації інтенсивності відмов ЕРВ з використанням композиції двох розподілів: експоненціального і нормального	66
2.4.3	Математична модель апроксимації інтенсивності відмов ЕРВ з використанням композиції двох	71

	розподілів: експоненціального та Вейбулла	12
2.5	Приклади використання композиції розподілів для побудови апроксимації інтенсивності відмов потужних НВЧ транзисторів	73
	Висновки до другого розділу	77
РОЗДІЛ 3	РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ З АКТИВНИМИ ФАЗОВАНИМИ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ	78
3.1	Постановка завдань	78
3.2	Дослідження впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності радіоелектронних систем з надмірністю	78
3.3	Побудова структурних схем надійності приймально-передавальних АФАР	87
3.4	Розроблення моделі надійності активної фазованої антенної підрешітки	89
3.5	Розроблення моделі надійності АФАР з дворівневою структурною схемою надійності	93
3.6	Розроблення та дослідження математичних моделей надійності каналів, модулів, антенної підрешітки та АФАР під час раптових і поступових відмов ППК	96
3.6.1	Розроблення та дослідження математичних моделей надійності каналів і модулів АФАР	96
3.6.2	Розроблення та дослідження математичної моделі надійності антенної підрешітки під час раптових і поступових відмов ППК	101
3.6.3	Розроблення та дослідження математичних моделей надійності передавальної АФАР під час раптових і поступових відмов ППК	104

	13
3.7 Розроблення та дослідження математичної моделі залежності показників надійності АФАР РС від температури активної зони кристала нітрид-галієвих транзисторів і мікросхем випромінюючих каналів	108
Висновки до третього розділу	115
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИ І ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ З АФАР	117
4.1 Постановка завдань	117
4.2 Практичні рекомендації щодо розрахунку надійності РС з АФАР у процесі проектування	117
4.2.1 Загальні положення	117
4.2.2 Цілі розрахунку надійності радіоелектронних систем	117
4.2.3 Загальна схема розрахунку радіоелектронних систем	118
4.2.4 Ідентифікація радіоелектронних систем	120
4.2.5 Методи розрахунку радіоелектронних систем	121
4.3 Метод розробки вимог до показників надійності каналів та модулів АФАР РЛС	123
4.3.1 Загальні положення	123
4.3.2 Вимоги до надійності ППК для експоненціального розподілу відмов	123
4.3.3 Вимоги до надійності ППК для композиції відмов експоненціального розподілу і дифузійного немонотонного розподілу	124
Висновки до четвертого розділу	124
ВИСНОВКИ	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	128
Додаток А. Список публікацій здобувача	
Додаток Б. Акти впровадження результатів роботи	

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ФАР	–	фазована антенна решітка
АФАР	–	активна ФАР
ПФАР	–	пасивна ФАР
РЛС	–	радіолокаційна система
РС	–	радіоелектронна система
ЗРК	–	зенітні ракетні комплекси
ЗП	–	запасні частини, інструменти, приладдя
БССН	–	багатофункціональна станція супроводу і наведення
НВЧ	–	надвисока частота
ТО	–	технічне обслуговування
ППМ	–	приймально-передавальний модуль
ППК	–	приймально-передавальний канал
МІС	–	монолітна інтегральна схема
ЕРВ	–	електрорадіовироби
КОГ	–	коефіцієнт оперативної готовності
КГ	–	коефіцієнт готовності
КТВ	–	коефіцієнт технічного використання
АРАА	–	active phased array antenna
DNR (ДНР)	–	дифузійний немонотонний розподіл
ER (EP)	–	експоненціальний розподіл
NR (НР)	–	нормальний розподіл
LNR (ЛНР)	–	логарифмічний нормальний розподіл
WR (ВР)	–	розподіл Вейбулла
УПР	–	узагальнений показовий розподіл
ІБР	–	імовірність безвідмовної роботи
ТЗ	–	технічне завдання
ТУ	–	технічні умови
СРО	–	система рідинного охолодження

МВЖ	–	технічні умови
ППМП	–	приймально-передавальний модуль підрешітки
АППМ	–	антенний приймально-передавальний модуль
ВІС	–	велика інтегральна схема
НВІС	–	надвелика інтегральна схема
ЕП	–	ескізний проект
ДП	–	державне підприємство
НДІ	–	науково-дослідний інститут
ССН	–	структурна схема надійності
КБ	–	конструкторське бюро
GaAs	–	арсенід-галієва технологія
GaN	–	нітрид-галієва технологія
ПЗНр	–	програма забезпечення надійності у процесі проектування

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** В останні роки бурхливий розвиток отримали радіоелектронні системи (РС) з активними фазованими антенними решітками (АФАР). З 2000 років почалося активне впровадження арсенід-галієвих технологій (GaAs) надвисокочастотних (НВЧ) монолітних інтегральних схем (МІС) в діючі системи озброєння, першими стали радіолокаційні станції (РЛС) винищувальної авіації і системи протиракетної оборони (ПРО). В якості напівпровідникового матеріалу НВЧ МІС для АФАР наступного покоління був обраний нітрид галію (GaN), який перевершує GaAs за напругою, тепловим характеристикам і енергоефективності. В даний час ступінь готовності GaN-технології в США повністю відповідає вимогам серійного військового виробництва. Це дозволяє відмовитися від використання GaAs в якості базового матеріалу МІС ПП-модулів для АФАР нових систем озброєння і замінити антенні GaAs решітки в діючих системах на GaN - решітки. АФАР радіоелектронних систем - не тільки технологічно складні, але і дуже затратні 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 РС з АФАР, що вирішують завдання супутникового зв'язку, метео спостережень, управління повітряним рухом, стеження за безпілотними об'єктами тощо.

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

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, темами**

Дисертаційна робота пов'язана з дослідно-конструкторськими роботами, які проводилися в ДП «НДІ «Квант» і спрямовані на розроблення та подальше вдосконалення моделей оцінки надійності радіоелектронних систем з АФАР. Здобувач починаючи з 2008 р брала активну участь у всіх розробках ДП «НДІ



«Квант» і ДП «НДІ «Квант-Радіолокація» як фахівець з оцінки показників надійності складних систем.

### **Мета і завдання дослідження**

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

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

1. розробити і дослідити моделі апроксимації кривих інтенсивностей відмов електрорадіовиробів з використанням відомих розподілів відмов: експоненціального, Вейбулла і дифузійного немонотонного розподілів, що адекватно враховують довідкову статистичну інформацію про раптові і поступові відмови;
2. провести розроблення та дослідження моделей оцінки надійності АФАР радіоелектронних систем при спільному проявленні раптових і поступових відмов каналів і модулів антенної решітки з використанням відомих розподілів відмов;
3. розробити математичну модель оцінки надійності АФАР в залежності від температури активної зони кристала GaN мікромодулів та визначити середній наробіток до відмови активної фазованої антенної решітки радіоелектронних систем;
4. розробити метод визначення вимог до середнього наробітку до відмови каналів та модулів АФАР радіоелектронних систем.

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

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

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

**Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:**

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

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

Вперше розроблено математичні моделі оцінки надійності АФАР з однорівневою та дворівневою структурними схемами надійності, які дозволяють отримувати оцінки надійності радіоелектронних систем з АФАР;

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

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

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

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

### **Обґрунтованість і достовірність наукових положень**

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

### **Практичне значення отриманих результатів**

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

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

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

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

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

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

- у концептуальному проекті (децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р.) і ескізному проекті (децимальний номер: ZRS RVN ANL 001 06 2017 р.) «Пересувного радіолокаційного поста багатофункціональної станції супроводу і наведення малої дальності зенітного ракетного комплексу» – розрахунки показників надійності АФАР і БССН ЗРК. Замовник: КБ «Південне»;

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

- у концептуальному проекті (децимальний номер: ZRS RVN ANL 00206, 2016 р.) і ескізного проекті (децимальний номер: ZRS RVN ANL 001 07 2017 р.) «Пересувного радіолокаційного поста багатофункціональної станції супроводу і наведення середньої дальності зенітного ракетного комплексу» – розрахунки показників надійності АФАР і БССН ЗРК Замовник: КБ «Південне».

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

### **Особистий внесок здобувача**

Постановка мети та завдань, обговорення результатів проведені разом з науковим керівником. Наукові роботи [37, 52, 53] виконані самостійно. З робіт, що опубліковані у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем. У роботах, опублікованих у співавторстві автору дисертації належить:

[35] – розроблені програми розрахунку методу технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіоелектронних систем за фактичним станом;

[36] – розроблені математичні моделі оцінки показників надійності активних фазованих антенних решіток з однорівневою і дворівневою структурною схемою надійності;

[38] – розроблені математичні моделі прогнозування показників безвідмовності та довговічності електрорадіовиробів;

[39] – розроблені програми розрахунків для імовірнісного аналізу електронних модулів і активних фазованих антенних решіток;

[40] – проведений критичний аналіз технологій прогнозування надійності електронних систем з використанням експоненціального та дифузійного немонотонного розподілів елементів, що відмовили;

[41] – отримані програми для визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування групи активних фазованих антенних решіток;

[42] – розроблені математичні моделі апроксимації кривих інтенсивностей відмов електрорадіовиробів з дифузійним немонотонним розподілом, розподілом Вейбулла, експоненціальним розподілом і композицією розподілів;

[43] – розроблені програми для оцінки показників надійності активної фазованої антенної решітки;

[44] – розроблені програми для оцінки середнього наробітку на відмову;

[45] – складена програма для розрахунків аналітичних виробів алгоритму технічного обслуговування за фактичним станом;

[46] – розроблені методи для визначення вимог до показників надійності каналів і модулів активної фазованої антенної решітки радіоелектронних систем;

[47] – представлено показники безвідмовності і довговічності електрорадіовиробів корабельних радіоелектронних систем за статистичними даними;

[48] – представлено оцінки показників надійності електрорадіовиробів країн ближнього і далекого зарубіжжя;

[49] – представлено аналітичні вирази для розрахунку середнього та залишкового ресурсу корабельних радіоелектронних комплексів;

[50] – представлено оцінку показників надійності оптоелектронної елементної бази;

[51] – представлено оцінку показників надійності електрорадіовиробів радіоелектронних систем в зарубіжних довідниках.

**Апробація матеріалів дисертації** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та ухвалені на наукових конференціях, а саме:

- Науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» в 2010 р. у м. Київ;
- II науковій конференції «Проблеми експлуатації і розвитку ракетно-артилерійського озброєння військово-морських сил України» в 2011 року у м. Севастополь;
- XII міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» в 2013 р. у м. Київ; Міжнародній науковій конференції «Статистичні методи обробки сигналів і даних» в 2013 р. у м. Київ;
- Науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку навігації, спостереження та організації повітряного руху GNS/ATM» в 2014 р. у м. Київ.

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

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 150 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 124 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 13 таблицями, 40 рисунками. Список використаних джерел містить 130 найменування, з них 90 кирилицею та 40 латиницею.

**РОЗДІЛ 1**  
**КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНУ**  
**ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ**  
**СИСТЕМ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ**

**1.1 Коротка характеристика радіоелектронних систем з активними фазованими антенними решітками**

Провідні країни світу широко застосовують АФАР під час розроблення нових радіоелектронних систем: в наземних і корабельних РЛС ППО і ПРО, а також РЛС у військовій авіації [8, 93]. Широке застосування АФАР отримали при реалізації космічних технологій – в супутникових системах зв'язку [93].

*Таблиця 1.1*

**Кількість приймально-передавальних модулів в АФАР різних РС**

Назва виробу-аналога	Країна-розробник	Кількість ППМ
1	2	3
Корабельна РЛС AN/SPY-6 - активна твердотільна ФАР	США	4 решітки по 5528 модулів
Наземна РЛС Cobra Judy	США	20 000 модулів
Адаптивний морський радіолокатор SAMSON	Великобританія	918 елементів, 156 ППМ 2-х ватної імпульсної міцності
Ширококутовий морський радіолокатор APAR	ФРН, Нідерланди	4 АФАР по 4096 ППМ

*Продовж. табл. 1.1*

1	2	3
Авіаційна РЛС для винищувачів F - 22	США	2000 ППМ
Авіаційна РЛС для винищувачів Falcon	Ізраїль, Швеція	700 ППМ
Супутникова система - сузір'я «Ірідіум», 66 супутників на орбіті 198 антен	США	На одному супутнику три АФАР по 100 ППМ кожна
Супутникова система зв'язку GLOBAL STAR, 48 супутників на орбіті	США	91 передавальних модулів, 61 - приймальний модуль на одному супутнику

## 1.2 Аналіз моделей відмов та моделей надійності електрорадіовиробів

### 1.2.1 Основні поняття і визначення моделей відмов та моделей надійності

**Модель відмов** – математична модель відмов у вигляді функції розподілу відмов або імовірності появи відмови в заданий момент часу (функції розподілу часу до відмови).

**Модель надійності** – математична модель, що встановлює зв'язок між показниками надійності об'єкта, характеристиками надійності елементів, його структури і параметрів процесу функціонування об'єкта.

**Імовірнісні (статистичні) моделі відмов** – моделі, що встановлюють зв'язок імовірності появи відмов з наробітком.

**Імовірнісно-фізичні моделі відмов** – моделі, що встановлюють зв'язок імовірності появи відмови (показників надійності) з характеристиками фізичних процесів деградації, що призводять до відмови.

**Визначальний параметр** – фізичний або функціональний параметр, значення якого визначає працездатність об'єкта (досягнення визначальним



параметром деякого найбільшого або найменшого значення означає, що об'єкт наведено в неробочий стан).

*Механізм відмови* – фізичний, хімічний чи інший процеси, який привів до відмови.

Математичні моделі надійності є ідеалізацією законів функціонування технічних об'єктів, вони дозволяють в імовірнісній формі передбачити поведінку об'єктів в реальних умовах функціонування і оцінити багато кількісних характеристик надійності. При цьому ступінь ідеалізації в основному визначається вимогою простоти моделей, що використовуються.

Імовірнісні методи теорії надійності залучаються для виявлення і опису фізико-хімічних процесів і явищ, що впливають на надійність і призводять до відмов, встановлення їх кінетичних закономірностей в залежності від стану елементів і зовнішніх впливів, опису взаємодії елементів системи тощо.

Математичні моделі надійності елементів, які використовуються на практиці, є зазвичай прості закони розподілу випадкових величин. Показники надійності при цьому є деякими функціями параметрів математичної моделі.

Моделі надійності технічних систем – більш складні функціональні залежності, що враховують моделі відмов елементів і структуру системи.

Визначення показників надійності на підставі імовірнісних моделей включає, як правило, три етапи.

Спочатку на першому етапі встановлюється тип моделі (вид розподілу). Це може бути зроблено на підставі відомих законів розподілу, отриманих для об'єктів-аналогів, шляхом використання апріорної інформації про фізико-статистичні механізми процесів або шляхом обробки результатів експериментальних досліджень об'єкта. На другому етапі оцінюються параметри розподілу і таким чином встановлюється конкретний вид імовірнісної моделі для даного технічного об'єкта. На третьому етапі на підставі отриманої імовірнісної моделі (закону розподілу) визначаються необхідні показники надійності.

В якості імовірнісних моделей надійності елементів використовуються дискретні і безперервні розподіли.

Дискретні розподіли описують випадкові величини, які приймають кінцеву або рахункову кількість значень (число відмов, число справних або відмовивших об'єктів тощо).

У безперервних розподілах в теорії надійності безперервною випадковою величиною зазвичай є час або наробіток - час безвідмовної роботи, появи відмови, відновлення, наробіток на відмову, між відмовами, до відмови тощо. Модель відмов (функції розподілу)  $F(t)$  і модель надійності (імовірності безвідмовної роботи)  $P(t)$  пов'язані співвідношенням  $F(t) + P(t) = 1$

Побудова моделі надійності передбачає визначення аналітичного виразу для імовірності безвідмовної роботи.

### 1.2.2 Види відмов

#### Раптові відмови (схема миттєвих пошкоджень)

Під час спостереження раптових відмов апаратури відмова електрорадіоелементів (електрорадіовиробів (далі ЕРВ)) настає в тому випадку, коли навантаження на ЕРВ перевищує деякий допустимий рівень. Внаслідок випадкового характеру зміни навантаження момент відмови також є випадковим і не залежить від стану ЕРВ, від того, скільки часу він перебував у експлуатації. Розрізняють схеми раптових відмов ЕРВ зі зростаючою, постійною і спадаючою інтенсивністю.

#### Поступові відмови (схема накопичувальних пошкоджень)

Ця схема реалізується, коли в процесі функціонування виробу в його ЕРВ накопичуються зміни (пошкодження). Поступове старіння і (або) знос призводять до того, що їх робочі параметри виходять за встановлені допустимі межі. Поступово погіршується якість функціонування всього виробу. Вихід за нижню допустиму межу якості функціонування (наприклад, точності, швидкодії, потужності, тощо) тягне за собою відмову виробу в цілому.

*Схема релаксації*

Ця схема спостерігається в тих випадках, коли знос і (або) старіння можуть бути непрямою причиною відмови. Якщо, наприклад, допустимі межі на параметри ЕРВ не встановлені, то поступова зміна параметрів може привести до стрибкоподібної зміни стану виробу.

#### *Схема дії декількох незалежних причин*

Перераховані вище три схеми відмови на практиці часто реалізуються у поєднанні один з одним. Багато ЕРВ відмовляють через підвищення навантаження і через поступове старіння [16-18, 29].

### **1.2.3 Імовірнісні моделі надійності**

#### Експоненціальний розподіл

Найбільш простий і разом з тим один з найбільш популярних, з точки зору використання моделей, є експоненціальний (показовий) розподіл (ЕР) наробіток на відмову, який впливає з виразу основного закону надійності при постійному значенні інтенсивності відмов  $\lambda = \text{const}$  (табл. 1.2).

Властивості експоненціального розподілу:

- a) є окремим випадком розподілу Вейбулла і гамма-розподілу;
- b) характеризується постійною інтенсивністю відмов -  $\lambda$  (параметр розподілу). Постійна інтенсивності відмов означає, що імовірність відмов об'єкта не залежить від того, скільки часу він пропрацює до розгляду моментів часу, тобто експоненціальний розподіл абсолютно не враховує старіння і знос;
- c) має максимальну щільність відмов в момент включення, тобто відповідає низькій технології і якості виготовлення та збірки, виключає технологічний приробіток і доведення.

Зазначені властивості експоненціального розподілу обумовлюють досить істотні методичні похибки під час оцінки показників надійності (особливо при дальньому прогнозі середнього або гамма-відсоткового ресурсу, при розрахунку показників безвідмовності великих систем).

Широке використання експоненційної моделі пояснюється, в першу чергу, тим, що вона описує період нормальної експлуатації, коли

інтенсивність відмов  $\lambda$  приблизно постійна і старіння об'єкта ще мало позначається на його надійності. Також експоненціальний розподіл типовий для технічних систем, що складаються з великої кількості елементів з різними розподілами наробітку до відмови.

Важливою властивістю експоненціальної моделі надійності є те, що імовірність безвідмовної роботи і імовірність відмови в інтервалі часу залежать тільки від довжини цього інтервалу і не залежать від попереднього часу  $t$ :

$$t, t + \delta t \text{ (тобто } P(t, t + \delta t) \text{ і } Q(t, t + \delta t)) \quad (1.1)$$

Ця властивість значною мірою обмежує можливості використання цієї моделі – вона може застосовуватися тільки у випадках, коли незворотні зміни (старіння) об'єктів несуттєві і відмови пов'язані тільки з випадковими впливами.

#### Нормальний розподіл

Нормальний розподіл найчастіше використовується для опису поступових відмов зношення. Він утворюється, коли на випадкову величину діє велика кількість рівноправних чинників. Його недоліком в деяких випадках може виявитися наявність області негативних значень аргументу, що для опису наробітку на відмову не має сенсу. З метою усунення цього недоліку можна скористатися усіченим нормальним розподілом (NR) або логарифмічно нормальним розподілом (LNR) (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

## Аналітичні вирази характеристик імовірнісних розподілів

Характеристика розподілу	Розрахункова формула	Номер формули
1	2	3
	<i>Експоненціальний розподіл (ER)</i>	
Щільність розподілу	$f(t) = \frac{1}{\lambda} \exp(-\lambda t)$	1.2
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$	1.3
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$P(t) = \exp(-\lambda t)$	1.4
Інтенсивність відмов	$\Lambda(t) = \lambda$	1.5
Математичне очікування (середній наробіток до відмови)	$M(t) = T_0 = \frac{1}{\lambda}$	1.6
Дисперсія	$D(t) = \frac{1}{\lambda^2}$	1.7
	<i>Усічений нормальний розподіл (NR)</i>	
Щільність розподілу	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	1.8
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$	1.9
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$P(t) = \Phi\left(\frac{\mu-t}{\sigma}\right)$	1.10

1	2	3
Інтенсивність відмов	$\Lambda(t) = \frac{\exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]}{\phi\left(\frac{\mu-t}{\sigma}\right)\sigma\sqrt{2\pi}}$	1.11
Математичне очікування (середній наробіток до відмови)	$M(t) = T_0 = \mu$	1.12
Дисперсія	$D(t) = \sigma^2 \text{ де: } \sigma = v\mu, v - \text{коефіцієнт варіації}$	1.13
	<i>Логарифмічний нормальний розподіл (LNR)</i>	
Щільність розподілу	$f(t) = \frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	1.14
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)$	1.15
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$P(t) = \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)$	1.16
Інтенсивність відмов	$\Lambda(t) = \frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \frac{1}{\phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)}$	1.17
Математичне очікування (середній наробіток до відмови)	$M(t) = T_0 = \exp(\mu + 0,5\sigma^2)$	1.18
Дисперсія	$D(t) = [\exp(\sigma^2) - 1]\exp(2\mu + \sigma^2)$	1.19

Таблиця 1.3

## Аналітичні вирази характеристик імовірнісних розподілів

Характеристика розподілу	Розрахункова формула	Номер формули
1	2	3
	<i>Розподіл Вейбулла (WR)</i>	
Щільність розподілу	$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right]$	1.20
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right]$	1.21
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right]$	1.22
Інтенсивність відмов	$\Lambda(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}$	1.23
Математичне очікування (середній наробіток до відмови)	$M(t) = T_0 = a\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$	1.24
Дисперсія	$D(t) = a^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) \right]^2 \right\},$ де $\Gamma(x)$ – гамма функція	1.25
	<i>Дифузійний немонотонний розподіл (DNR)</i>	
Щільність розподілу	$f(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{vt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right]$	1.26
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = DN(t; \mu; v) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{v\sqrt{\mu t}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{t+\mu}{v\sqrt{\mu t}}\right)$	1.27
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$P(t) = \Phi\left(\frac{\mu-t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu+t}{v\sqrt{\mu t}}\right)$	1.28

1	2	3
Інтенсивність відмов	$\Lambda(t) = \frac{\exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right]\sqrt{\mu}}{vt\sqrt{2\pi t}\left[\Phi\left(\frac{\mu-t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right)\Phi\left(-\frac{\mu+t}{v\sqrt{\mu t}}\right)\right]}$	1.29
Математичне очікування (середній наробіток до відмови)	$M(t) = T_0 = \mu$	1.30
Дисперсія	$D(t) = \mu^2 v^2$	1.31
	<i>Суперпозиція експоненційних розподілів (n=2) (ER+ER)</i>	
Щільність розподілу	$f(t) = C_1\lambda_1 \exp(-\lambda_1 t) + C_2\lambda_2 \exp(-\lambda_2 t)$	1.32
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = 1 - C_1 \exp(-\lambda_1 t) - C_2 \exp(-\lambda_2 t)$	1.33
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$P(t) = C_1 \exp(-\lambda_1 t) + C_2 \exp(-\lambda_2 t)$	1.34
Інтенсивність відмов	$\Lambda(t) = \frac{C_1\lambda_1 \exp(-\lambda_1 t) + C_2\lambda_2 \exp(-\lambda_2 t)}{C_1 \exp(-\lambda_1 t) + C_2 \exp(-\lambda_2 t)}$	1.35
Математичне очікування (середній наробіток до відмови)	$M(t) = T_0 = \frac{C_1}{\lambda_1} + \frac{C_2}{\lambda_2}$	1.36

Нормальний розподіл використовується для оцінки тимчасового опору, границь текучості та витривалості однорідних матеріалів, може також використовуватися для імовірнісних розрахунків міцності конструкції.

Логарифмічно нормальний розподіл використовується для опису довговічності металів, відмов зношення матеріалів, старіння електронної апаратури, процесів відновлення деяких об'єктів тощо.



### Розподіл Вейбулла [19,22]

Експоненціальний розподіл можна узагальнити розподілом Вейбулла (WR). На відміну від експоненціального, розподіл Вейбула задається двома параметрами. Параметр  $\lambda$  визначає масштаб кривої розподілу (при його зміні крива стискається або розтягується). Параметр форми  $\alpha$  робить модель Вейбулла універсальною (табл. 1.3).

При  $\alpha < 1$  модель Вейбулла дозволяє описувати приробітні відмови, обумовлені прихованими дефектами, при  $\alpha = 1$  - раптові відмови в період нормальної експлуатації, при  $1 < \alpha < 2$  - відмови швидко старіючих об'єктів, у яких майже немає прихованих дефектів, при  $\alpha > 2$  – відмови зношення. Крім того, при  $\alpha = 2$  (розподіл Релея) модель описує функціонування об'єкта, що складається з декількох послідовно з'єднаних дубльованих елементів.

Розподіл Вейбулла використовують для опису міцності сплавів на основі заліза і деяких властивостей кольорових металів.

### Суперпозиція розподілів

Для того щоб отримати теоретичний розподіл, близький до експериментального, іноді щільність розподілу наробітку до відмови або між відмовами зручно представити у вигляді суми (суміші) декількох розподілів. Така модель відмов називається суперпозицією розподілів (табл. 1.3).

## **1.2.4 Імовірнісно-фізичні моделі надійності**

### Дифузійний немонотонний розподіл (DNR)

Якщо фізичний процес деградації об'єкта описується випадковим процесом з немонотонними реалізаціями, а в загальному випадку з монотонними та немонотонними реалізаціями, то розподіл відмов буде апроксимувати дифузійним немонотонним розподілом (DNR - розподілом) [66-68]. Немонотонний характер зміни деяких фізичних параметрів спостерігається у виробках електронної техніки, наприклад, при електроміграції в тонкоплівковій металізації, у випадку генерації і переміщення зарядів на поверхні кристалів напівпровідникових структур

тощо. Таким чином, процеси деградації виробів електронної техніки поряд з монотонними реалізаціями (скупчення дислокацій, пластичній деформації, пошкодження внаслідок електричних явищ мають і немонотонні реалізації). Тому в загальному випадку прийнято розглядати деградації виробів електронної техніки як процес з немонотонними реалізаціями.

Властивості DN - розподілу:

- має позитивну асиметрію, асимптотично сходиться до нормального розподілу (при  $v^2 \rightarrow 0$ ) сходиться до нормального розподілу, що свідчить про універсальний характер розподілу;
- інтенсивність відмов DN - розподілу має немонотонний характер, в асимптотиці (при  $t \rightarrow \infty$ ) прагне до кінцевої границі (константи), що рівна  $(2v^2\mu)^{-1}$ .
- параметри DN - розподілу можуть бути оцінені як на основі статистики відмов, так і на основі фізичних процесів деградації, що призводять до відмов, а також на основі спільного використання статистичної інформації обох згаданих типів (табл. 1.3).

### 1.2.5 Розподіл, який описує накладення декількох причин відмов

Розподіл, який описує накладення декількох незалежних причин відмов  $n$ , апроксимується композицією розподілів, тоді імовірність безвідмовної роботи ЕРВ визначається добутком імовірностей безвідмовної роботи, що враховують всі  $n$  причин відмов:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad 1.37$$

де:  $P_i(t)$ - імовірність безвідмовної роботи, яка враховує  $i$  інтенсивність відмов ЕРВ,  $i = \overline{1, n}$ .

Наприклад, якщо відмови об'єкта відбуваються під дією двох незалежних чинників, що призводять до відмов по експоненціальному та нормальному законам, то результуюча модель буде являти собою композицію цих розподілів.

Так вченими Герцбахом І.Б. і Кордонським Х.Б. у [16] описана схема миттєвих пошкоджень (раптових відмов), тобто відмови з вини «пікових навантажень», і схема накопичення пошкоджень (поступових відмов), що призводить до нормального розподілу. Подібне накладення двох причин відмов описується розподілом мінімуму експоненційної і нормально-розподіленої випадкових величин (табл. 1.3).

### 1.2.6 Порівняльний аналіз моделей відмов елементів

Порівняльний аналіз моделей відмов, представлений найбільш повно в міждержавному стандарті ГОСТ 27.005-97 [88], показує, що за всіма вимогами (фізична адекватність, можливості розрахунку надійності, універсальність і практична придатність), що пред'являються до моделей відмов, дифузійні розподіли мають переваги перед іншими моделями (Вейбулла, логарифмічно нормальним, експоненціальним,  $\alpha$  - розподілами).

Функції дифузійних розподілів, також як і нормального, виражаються через широко табульовану функцію Лапласа. Вони є досить простими і цілком відповідають інженерній практиці.

Процес деградації механічних об'єктів внаслідок незворотності процесів руйнування (механічне зношування, втоми, контактної втоми) прийнято розглядати як марковський процес з монотонними реалізаціями. Тому процес деградації механічних об'єктів описується дифузійним монотонним розподілом.

Процес деградації виробів електронної техніки має немонотонний характер, який прийнято розглядати як марковський процес з немонотонними реалізаціями. Тому процес деградації виробів електронної техніки описується дифузійним немонотонним розподілом.

Проведений аналіз моделей відмов ЕРВ показав, що під час розроблення математичних моделей надійності АФАР для різних типів відмов транзисторних каналів, модулів, мікромодулів та вторинних джерел живлення доцільно використовувати такі типи розподілів:

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

### **1.3 Недоліки експоненціального розподілу відмов при прогнозуванні надійності радіoeлектронних елементів**

Застосування експоненціального закону для розрахунків надійності РС показує, що його можна використовувати в тих випадках, коли електронні елементи не старіють, тобто залишковий час життя елементів не залежить від того, скільки часу вони пропрацювали до даного моменту [40, 67].

Тому використання експоненціального розподілу дозволяє враховувати тільки раптові відмови елементів і визначати показники безвідмовності складових частин РС: наробітку до відмови невідновлюваних і наробітку на відмову відновлюваних складових частин, а також ймовірність безвідмовної роботи.

Так як експоненціальний розподіл абсолютно не враховує старіння і знос, це виключає можливість вибору більш якісних матеріалів під час виробництва виробів або проведенні профілактичних робіт у процесі експлуатації. Тому визначення показників довговічності електронних елементів і складових частин РС (ресурсу і терміну служби) з використанням експоненціального розподілу призводить до великих погрешностей.

У ряді робіт зарубіжних фахівців абсолютно справедливо відзначається, що широко поширений американський стандарт MIL-HDBK-217, заснований на використанні експоненціального розподілу, не призначений для того, щоб забезпечити показник надійності з гарантованою точністю [95, 101]. Швидше,

він призначений для використання в якості інструменту при оцінці придатності і порівнянні варіантів нових проектів. Модель експоненціального розподілу вже давно різко критикувалася вченими і фахівцями промисловості.

Узагальнюючи вітчизняну і світову практику використання однопараметричного експоненціального розподілу при проектуванні РС, слід зробити висновок, що його доцільно використовувати лише на ранніх етапах проектування для обґрунтування варіанту структурної побудови електронних систем і не можна використовувати для отримання остаточних (уточнених) оцінок показників безвідмовності і довговічності високонадійних систем.

#### **1.4 Застосування імовірнісно-фізичних моделей оцінки надійності радіоелектронних систем**

У світовій практиці прогнозування надійності для обліку зносу і старіння механічних елементів (поступових відмов) використовуються також двопараметричні розподіли: нормальний, логарифмічно-нормальний Вейбулла, гамма, лінійний тощо. Однак основним недоліком при використанні даних розподілів є недостатнє урахування явищ зносу і старіння, так як забезпечується тільки формальне: збіг теоретичної та статистичної функцій розподілу часу життя елементів [66-69].

У відділі надійності Інституту проблем математичних машин і систем НАН України протягом останніх трьох десятиліть розроблена і розвивається нова методологія дослідження надійності з використанням імовірнісно-фізичних методів.

В даний час добре досліджені методи вирішення усіх основних завдань надійності виробів (оцінки надійності елементів механічних та електронних виробів, технічних систем) на основі двопараметричних: дифузійного монотонного (DM) і дифузійного немонотонного (DN) розподілів [104, 105].

При цьому визначаються найбільш повні характеристики надійності - функції розподілу наробітку (до відмови, на відмову, ресурсу тощо), які

дозволяють оцінити будь-які показники надійності (середній наробіток, гамма-відсотковий ресурс, імовірність безвідмовної роботи за заданий інтервал наробітку, залишковий ресурс тощо).

Необхідно відзначити, що імовірісно-фізичні методи оцінки показників надійності вельми ефективні в умовах спостереження (під час експлуатації) високонадійних об'єктів, зокрема, обладнання атомних електростанцій, коли є мала статистика про відмови.

Застосування DN - розподілів показало їх високу ефективність у процесі прискорених випробувань для прогнозування показників надійності електронних елементів: великих (ВІС) і надвеликих інтегральних схем (НВІС), активних і пасивних електронних елементів (транзисторів, діодів, конденсаторів, резисторів тощо) [69 - 71].

### **1.5 Аналіз відмов передавальних модулів високої частоти АФАР за експериментальними даними**

Аналіз відмов передавальних модулів високої частоти АФАР за експериментальними даними показав що:

1. У роботі [2] – за результатами аналізу статистичних експериментальних даних потік відмов конструктивних елементів БФ РЛС з АФАР визначається розподілом Вейбулла.
2. У роботі [17] – залежність відсотка відмов НВЧ передавальних модулів від числа термоциклів також визначається розподілом Вейбулла.

## 1.6 Оцінка показників надійності проєктованих радіоелектронних систем

*Розробка технічного завдання на систему, технічної пропозиції та ескізного проєкту*

У процесі розробки технічної пропозиції, ескізного проєкту і технічного завдання на систему виконуються наступні основні роботи щодо прогнозування надійності:

- визначення умов експлуатації РС;
- складання попереднього переліку елементної бази;
- збір інформації про експлуатаційну надійність електронних елементів, застосовуваних у виробі (з урахуванням фізики відмов елементної бази);
- виконання наближеного (прикидочного розрахунку) показників безвідмовності і ремонтпридатності варіантів побудови виробу під час використання експоненціального розподілу часу життя електронних елементів;
- визначення і коригування вимог щодо надійності в ТЗ на виріб [89, 90].

*Розробка технічного та робочого проєкту системи*

У процесі розробки технічного і робочого проєкту виробу на основі розроблених структурних і принципів електричних схем виробу проводяться:

Орієнтовний і уточнений розрахунки безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності виробу з використанням сучасних двопараметричних імовірнісних розподілів: DN і DM - розподілів, нормального і логарифмічно-нормального розподілу, розподілу Вейбулла тощо [66 - 68].

Визначаються показники надійності виробу і його складових частин:

- показники безвідмовності - імовірність безвідмовної роботи, середній наробіток на (до) відмову, параметр потоку (інтенсивність) відмов;
- показники довговічності - гамма-відсотковий ресурс, середній ресурс, середній термін служби [69];

- показники ремонтпридатності: середній час контролю працездатності, середній час відновлення;

- комплексні показники надійності: коефіцієнт готовності, коефіцієнт оперативної готовності, коефіцієнт технічного використання.

Розробляються програми збору та обробки інформації про відмови і несправності в процесі контрольних і визначальних випробувань виробу з використанням двопараметричних імовірнісних розподілів.

Визначаються показники системи технічного обслуговування виробу: розраховуються залишкові ресурси, проводиться розрахунок оптимальних комплектів ЗП, визначаються оптимальні періодичності контролю працездатності, профілактичних заміни і профілактичного обслуговування з використанням двопараметричних розподілів.

### 1.7 Оцінка показників надійності радіоелектронних систем типу АФАР

Для оцінки надійності радіоелектронних систем типу АФАР застосовується традиційна математична модель розрахунку надійності резервованої невідновлювальної структури з ковзаючим гарячим резервом (що складається з  $n$  - робочих і  $m$  - резервних ідентичних елементів) відповідно до [82] визначається наступними формулами:

- для імовірності безвідмовної роботи:

$$P_c(t_0) = \sum_{j=0}^m C_{n+m}^j p^{n+m-j} q^j \text{ – точне значення} \quad (1.38)$$

$$P_c(t_0) \approx 1 - C_{n+m}^{m-1} q^{m+1} \text{ – приближене значення} \quad (1.39)$$

- для середнього наробітку до відмови  $T_{0c}$  при експоненціальному законі розподілів відмов елементів до відмови:

$$T_{0c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=0}^m \frac{1}{n+m-j} \text{ – точне значення} \quad (1.40)$$



$$T_{0c} \approx \frac{1}{\lambda_0} \left[ \ln \left( \frac{n+m}{n} \right) - \frac{m}{n(n+m)} \right], \text{ -- приблизне значення} \quad (1.41)$$

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

Недоліками розглянутої моделі оцінки надійності є :

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

Так як сучасні АФАР РС можуть налічувати від кількох до десятків тисяч приймально-передавальних модулів і розподіли відмов модулів можуть відрізнятися від експоненціального, тому необхідно розробка нових більш адекватних математичних моделей оцінки надійності радіоелектронних систем з АФАР.

### **Висновки до першого розділу**

Короткий огляд літературних джерел показав що у світовій практиці проектування під час оцінки показників надійності радіоелектронних систем використовується, в основному, експоненціальний розподіл відмов елементів. З огляду на недоліки експоненціального розподілу відмов і фізику відмов НВЧ транзисторів і мікромодулів, пропонується під час оцінки надійності радіоелектронних систем з АФАР використовувати не тільки експоненціальний розподіл для обліку раптових відмов елементів, але й розподіли, що враховують поступові відмови елементів: нормальний, Вейбулла і дифузійний немонотонний розподіл. Використання технології імовірно-фізичного аналізу надійності може дозволити отримати великий економічний ефект, зменшивши вартість розробки РС з АФАР на 15% - 30%.

Отже, для оцінки надійності радіоелектронних систем з АФАР, що проектуються повинні бути вирішені наступні завдання:

1. Розробка математичних моделей апроксимації інтенсивностей відмов електрорадіовиробів з розподілом імовірностей, які враховують як раптові так і поступові відмови.
2. Розроблення математичних моделей оцінки надійності каналів і модулів РЕС, що адекватно відображать статистичну довідкову інформацію про раптові і поступові відмови електрорадіовиробів.
3. Розроблення і дослідження математичних моделей оцінки надійності АФАР РС з однорівневою і дворівневою структурною схемою надійності під час раптових і поступових відмовах каналів та модулів.
4. Розроблення вимог до надійності каналів і модулів у процесі проектування АФАР РС.
5. Розроблення математичних моделей оцінки надійності АФАР РС з урахуванням температури активної зони кристала GaN транзисторів і мікросхем випромінюючих каналів.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ АПРОКСИМАЦІЇ КРИВИХ ІНТЕНСИВНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОРАДІОВИРОБІВ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬСЯ ПРОЯВОМ РАПТОВИХ І ПОСТУПОВИХ ВІДМОВ

#### 2.1 Постановка завдань

У другому розділі дисертації:

- розглянуті розроблення моделей оцінки показників надійності електрорадіовиробів на основі статистичних даних про відмови.

- розглянуто висновок аналітичних залежностей і параметрів моделей надійності ЕРВ від характеристик статистичних даних, представлених у довіднику щодо надійності під час:

1. Моделі апроксимації кривої інтенсивності відмов ЕРВ, що характеризуються проявом тільки поступових відмов, яка використовує дифузійний немонотонний розподіл (підрозділ 2.3).

2. Моделі апроксимації кривої інтенсивності раптових і поступових відмов ЕРВ на основі трьох комбінацій двох розподілів: експоненціального і дифузійного немонотонного; експоненціального і Вейбулла; експоненціального і усіченого нормального розподілів (підрозділи 2.4 і 2.5).

Розроблені у другому розділі моделі апроксимації кривої інтенсивності раптових і поступових відмов ЕРВ будуть використані у третьому розділі під час розроблення моделей надійності каналів і модулів АФАР.

## 2.2 Дослідження типової кривої інтенсивності відмов електрорадіовиробів

### 2.2.1 Загальні положення

Для проведення прогнозування показників надійності електронної апаратури у процесі проектування використовується довідкова статистична інформація про інтенсивності раптових та поступових відмов і гамма-відсотковий ресурс електрорадіовиробів (ЕРВ), представлена в довідниках щодо надійності і технічних умов [77-81]. Для спрощення розрахунків показників надійності електронної апаратури застосовується гіпотеза про постійність інтенсивності відмов і експоненціального закону розподілу часу безвідмовної роботи ЕРВ. Шляхом нескладних розрахунків це дозволяє визначати показники безвідмовності - інтенсивності відмов ЕРВ і середній наробіток до відмови електронних модулів. Однак такий підхід дає можливість проводити тільки порівняння різних варіантів структурних схем для побудови системи на ранніх стадіях проектування електронної апаратури і виконувати орієнтовні оцінки показників безвідмовності апаратури, але не дозволяє прогнозувати показники безвідмовності і довговічності з урахуванням раптових і поступових відмов. Метод аналізу надійності апаратури за рахунок раптових відмов за проектуванням електронних систем, регламентований комплексами державних військових стандартів «Мороз-5», «Клімат-6» [89, 90], широко використовується в даний час на підприємствах оборонної промисловості.

Однак цей метод абсолютно не враховує поступові відмови ЕРВ за рахунок явищ зносу та старіння і не дозволяє прогнозувати показники безвідмовності і довговічності (ресурсу і терміну служби) електронної апаратури. На сучасному етапі розвитку науки і техніки впровадження комп'ютерної техніки та мережі Інтернет на підприємствах оборонної промисловості дозволяє прогнозувати показники безвідмовності і довговічності ЕРВ з використанням більш складних, ніж експоненціальний

закон розподілу, математичних моделей надійності. Математична модель надійності, що враховує поступові відмови ЕРВ, запропонована професором В.П. Стрельніковим у працях [66-68, 102, 103]. Однак дана модель не враховує раптові відмови на початковому періоді експлуатації та показники ресурсу ЕРВ - мінімальний наробіток і гамма-відсотковий ресурс.

### 2.2.2 Типова крива інтенсивності відмов ЕРВ

Тривалість життєвого циклу будь-якого елемента (електрорадіовиробу – ЕРВ) характеризується кривою зміни інтенсивності відмов. На рис. 2.1 зображена класична крива зміни інтенсивності відмов ЕРВ у часі [16, 29, 38, 42], за рахунок цього тривалість життєвого циклу ЕРВ ділиться на три ділянки.

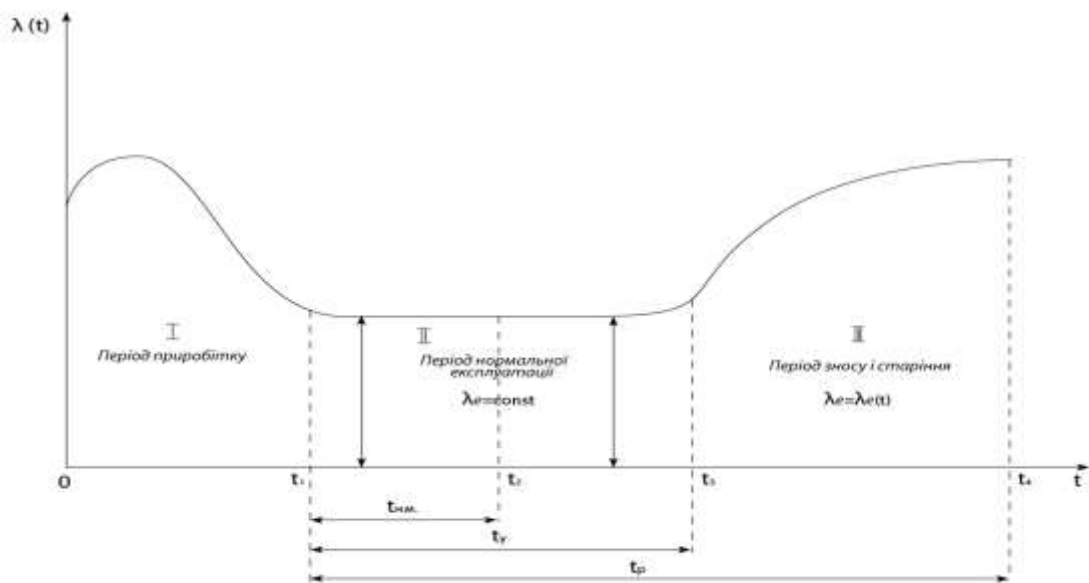


Рис. 2.1 Типова крива інтенсивності відмов ЕРВ

На відрізку часу від  $0$  до  $t_1$  проявляються ранні відмови через конструктивні або виробничі дефекти. Елементи, які містять дефекти, відмовляють протягом цього періоду – періоду приробітку.

Перша ділянка кривої визначає період приробітку ЕРВ, період I (зі спадаючою інтенсивністю відмов, що характеризується приробітними відмовами ЕРВ) - це початковий період.

На відрізку часу від  $t_1$  до  $t_3$  проявляються відмови, викликані випадковим збільшенням внутрішніх навантажень у системі або гранично важкими умовами роботи системи. Друга ділянка кривої, визначає період нормальної експлуатації – період II (мають місце раптові відмови і поступові відмови).

Останній період ( $t > t_3$ ) це період старіння та зношення. До цього часу у елементах виникають незворотні фізико-хімічні зміни, вони старіють, зношуються, їх надійність знижується, тобто інтенсивність відмов монотонно зростає. Третя ділянка кривої визначає період зношення і старіння – період III (значна перевага поступових відмов).

За рис 2.1 можна зробити висновок що:

а) тривалість нормальної експлуатації ЕРВ обмежується його гамма-відсотковим ресурсом;

б) тривалість третьої ділянки кривої обмежується тривалістю життя ЕРВ (тобто середнім ресурсом), тривалість третьої ділянки визначається різницею між середнім і гамма-відсотковим ресурсом.

Таким чином, період нормальної експлуатації (гамма-відсоткового ресурсу) ділиться на два періоди. Перший – початковий період. Характеризується постійністю значення експлуатаційної інтенсивності відмов і обмежується мінімальним наробітком. Другий – завершальний період. Характеризується поступовим зростанням інтенсивності відмов за рахунок переваги явищ старіння і зношення і обмежується гамма-відсотковим ресурсом.

В якості імовірнісних моделей елементів надійності використовуються дискретні і безперервні розподіли щільності імовірності розподілу випадкових величин. У безперервних розподілах в теорії надійності безперервною випадковою величиною зазвичай є час або наробіток – час безвідмовної

роботи, появи відмови, відновлення, наробіток на відмову, між відмовами, до відмови тощо.

### 2.2.3 Характеристика статистичної інформації про відмови ЕРВ, яка представлена в довідниках щодо надійності

Розрахунок показників надійності РС з АФАР виконується на основі статистичної інформації про відмови ЕРВ.

У довідниках щодо надійності ЕРВ [77-81] традиційно подається інформація про показники безвідмовності (інтенсивності раптових і поступових відмов) і показники довговічності ЕРВ (мінімальний наробіток і гамма-відсотковий ресурс).

У табл. 2.1 показаний розподіл відмов основних типів ЕРВ за видами відмов, представлений у довіднику щодо надійності ЕРВ: раптові відмови і поступові відмови (в % від загальної експлуатаційної інтенсивності відмов).

Таблиця 2.1

#### Розподіл відмов типів ЕРВ за постійними і раптовими видами

Тип електрорадіовиробів	Розподіл відмов за видами, %	
	Раптові	Поступові
1	2	3
Діоди кремнієві	20	80
Транзистори кремнієві	20	80
Тиристори	18	82
Діоди НВЧ	56	44
Транзистори НВЧ:		
– малої та середньої потужності;	48	52
– великої потужності	35	65

Продовж. табл. 2.1

1	2	3
Випромінювачі напівпровідникові	62	38
Оптопара	62	38
Мікросхеми оптоелектронні	50	50
Індикатори напівпровідникові	67	33
Резистори постійні недротяні	5	95
Конденсатори: – керамічні (напруга 1600 В та менше); – оксидно-електролітичні	41  76	59  24
Трансформатори	20	80
З'єднувачі низькочастотні для об'ємного монтажу	31	69
З'єднання (пайки)	0	100
Плати друковані для об'ємного монтажу з металевим наскрізним отвором	0	100

#### 2.2.4 Побудова математичних моделей апроксимації інтенсивностей відмов ЕРВ з використанням різних імовірнісних розподілів

Основними характеристиками надійності ЕРВ, що визначаються типовою кривою інтенсивності відмов, є:

- експлуатаційна інтенсивність повних (раптових і поступових) відмов ЕРВ

$$\lambda_{\text{повн.відм.}} = \lambda_{\text{рапт.відм.}} + \lambda_{\text{пост.відм.}} \quad (2.1)$$

- гамма-відсотковий ресурс  $-T_{P,\gamma}$ , при  $\gamma = 0,95$  - для основного масиву ЕРВ (рідше  $\gamma = 0,90$  - для невеликого масиву ЕРВ);



- мінімальний наробіток -  $t_{н.м.}$  (протягом якого проводяться випробування ЕРВ на довговічність).

Для досить точної апроксимації кривої інтенсивності відмов ЕРВ необхідно використовувати значення показників надійності ЕРВ не менше трьох моментів часу [38, 42]:

$$t_1 = 0, t_2 = t_{н.м.}, t_3 = T_\gamma \quad (2.2)$$

Це дозволяє сформулювати для трьох моментів часу три обов'язкові умови апроксимації кривої інтенсивності відмов ЕРВ:

$$1\text{-а умова: } t_1 = 0, P(t_1 = 0) = 1,00; \quad (2.3)$$

$$2\text{-а умова: } t_2 = t_{н.м.}, \lambda_{ЕРВ}(t_2 = t_{н.м.}) = \lambda_{ПОВН.ВІДМ.}; \quad (2.4)$$

$$3\text{-я умова: } t_3 = T_\gamma, P_{ЕРВ}(t_3 = T_\gamma) = \gamma \quad (2.5)$$

## **2.3 Розроблення математичної моделі апроксимації кривої інтенсивності поступових відмов ЕРВ на основі дифузійного немонотонного розподілу**

### **2.3.1 Математична модель апроксимації кривої інтенсивності поступових відмов ЕРВ, що використовує «спрощений» дифузійний немонотонний розподіл**

Відповідно до міждержавного стандарту ГОСТ 27.005-97 [88] дифузійний немонотонний розподіл, є найкращим з розподілів для розроблення математичної моделі надійності ЕРВ, які характеризуються проявом поступових відмов.

Тому далі розглядається висновок формул (аналітичних залежностей) для визначення показників DN - розподілу в залежності від довідкових статистичних даних: інтенсивності раптових і поступових відмов ЕРВ,

імовірності безвідмовної роботи, мінімального наробітку і гамма-відсоткового ресурсу.

Середній наробіток до відмови «спрощеного» дифузійного немонотонного розподілу (DNR - «спрощений») визначається з вирішення нелінійного рівняння за коефіцієнтом варіації  $v = 1$  [68]

$$\ln \lambda_E = \frac{1}{2} \left[ \ln T_{0\text{дн}} - \ln(2\pi t_{\text{н.м}}^3) - \frac{(t_{\text{н.м}} - T_{0\text{дн}})^2}{t_{\text{н.м}} T_{0\text{дн}}} \right], \quad (2.6)$$

де:  $\lambda_E$  – експлуатаційна інтенсивність відмов ЕРВ (обирається із довідника щодо надійності [78, 81])

На рис. 2.2 представлена номограма для визначення середнього наробітку до відмови «спрощеного» DNR. Аналогічна номограма представлена проф. Стрельниковим В.П. в ДСТУ 2862-94 [86] на рис. Е.1.

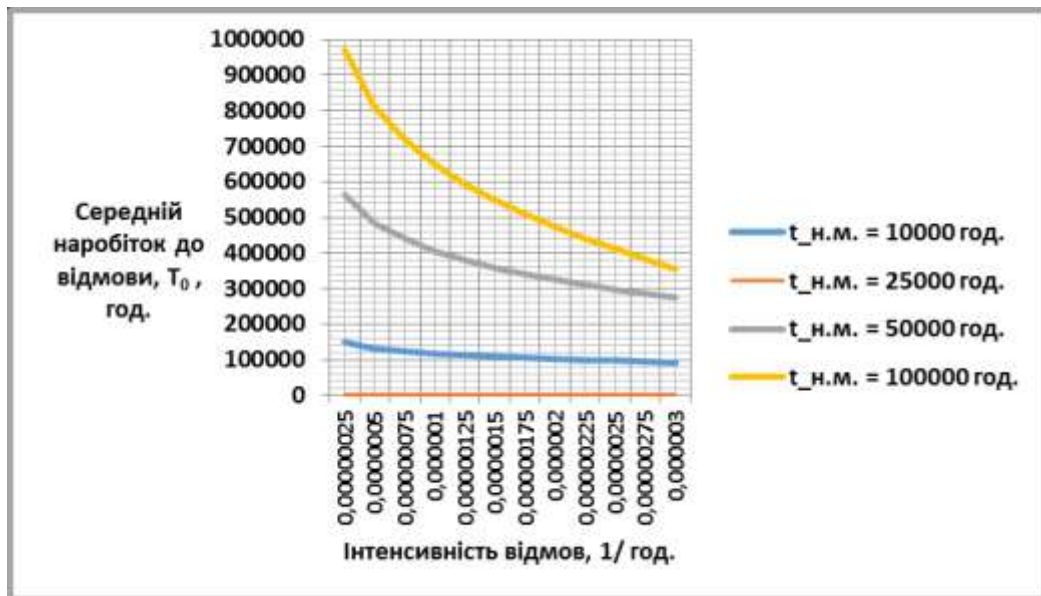


Рис. 2.2 Номограма для визначення середнього наробітку до відмови  $T_{0\_DNR}$  «спрощеного» дифузійного немонотонного розподілу (DNR «спрощений») в залежності від значення експлуатаційної інтенсивності відмов ЕРВ за різними значеннями мінімального наробітку -  $t_{\text{н.м.}}$

### 2.3.2 Математична модель апроксимації кривої інтенсивності поступових відмов ЕРВ, яка використовує «повний» дифузійний немонотонний розподіл

Імовірність безвідмовної роботи (ІБР) ЕРВ апроксимується дифузійним немонотонним розподілом (DNR)

$$P_{EPB}(t) \approx P_{DNR}(t); \quad (2.7)$$

Аналітичний вираз для ІБР, щільності розподілу та інтенсивності відмов розглянутої моделі надійності ЕРВ представлені у табл. 1.2 - 1.3.

Для забезпечення досить точної апроксимації моделі надійності ЕРВ необхідне дотримання не менш як трьох обов'язкових умов (для трьох моментів часу), тобто забезпечення виконання наступних умов [38, 42]:

$$1\text{-а умова: } t_1 = 0; P_{EPB\_DNR}(t_1 = 0) = 1; \lambda_{EPB\_DNR}(t_1 = 0) = 0; \quad (2.8)$$

$$2\text{-а умова: } t_2 = t_{н.м.}; \lambda_{EPB\_DNR}(t_2 = t_{н.м.}) = \lambda_{ПОСТ\_ВІДМ.}; \quad (2.9)$$

$$3\text{-я умова: } t_3 = T_\gamma; \lambda_{EPB\_DNR}(t_3 = T_\gamma) = \gamma \quad (2.10)$$

Для визначення середнього наробітку на відмову DNR -  $T_{0\_DNR}$  використовується друга (2.9) и третя (2.10) умова апроксимації, так як перша умова є умовою нормування. За цим отримуємо систему із двох нелінійних (трансцендентних) рівнянь відносно  $T_{0\_DNR}, \nu$ :

$$\lambda_{ДНР}(t_{н.м.}) = \frac{\frac{\sqrt{T_{0\_ДНР}}}{\nu t \sqrt{2\pi t_{н.м.}}} \exp\left[-\frac{(t_{н.м.} - T_{0\_ДНР})^2}{2\nu^2 T_{0\_ДНР} t_{н.м.}}\right]}{\phi\left(\frac{T_{0\_ДНР} - t_{н.м.}}{\nu \sqrt{T_{0\_ДНР} t_{н.м.}}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \phi\left(-\frac{T_{0\_ДНР} + t_{н.м.}}{\nu \sqrt{T_{0\_ДНР} t_{н.м.}}}\right)} \quad (2.11)$$

$$\gamma = \left(\frac{T_{0\_ДНР} - t_{н.м.}}{\nu \sqrt{T_{0\_ДНР} t_{н.м.}}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \phi\left(-\frac{T_{0\_ДНР} + t_{н.м.}}{\nu \sqrt{T_{0\_ДНР} t_{н.м.}}}\right)$$

Для цього вносимо наступні значення:

$$t_{\text{Н.М.}} = zT_{\gamma}, \quad x = \frac{T_{\gamma}}{T_{0\_DNR}}, \quad zx = \frac{t_{\text{Н.М.}}}{T_{0\_DNR}} \quad (2.12)$$

$$\lambda_{\text{повн\_відм.}} = \lambda_{\text{пост\_відм.}} \quad (2.13)$$

Після чого система нелінійних рівнянь спрощується таким чином:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\text{повн\_відм.}} &= \frac{\frac{1}{vz\sqrt{2\pi zx}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{2v^2zx}\right]}{T_{\gamma} \left[ \Phi\left(\frac{1-zx}{v\sqrt{zx}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+zx}{v\sqrt{zx}}\right) \right]} \\ \ln \left[ \Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{x+1}{v\sqrt{x}}\right) \right] - \ln \gamma &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

З другого рівняння системи (2.15) за заданими вихідними значеннями  $v, \gamma$

чисельними методами визначається значення змінної  $x$ . Підставляючи значення змінної  $x$  в перше рівняння системи (2.15) за заданими вихідними значеннями  $v, z, T_{\gamma}$  визначається значення  $\lambda_{\text{пост\_відм.}}$

На рис. 2.3 представлена номограма для визначення коефіцієнта варіації DNR за різними значеннями імовірності  $\gamma$  в залежності від добутку експлуатаційної інтенсивності поступових відмов ЕРВ на гамма-процентний ресурс. На рис. 2.4 представлена номограма для визначення нормованого (за гамма-відсотковим ресурсом) наробітку до відмови ЕРВ в залежності від коефіцієнта варіації DNR.

Використовуючи номограми на рис. 2.3 і рис. 2.4 за обраними з довідника щодо надійності ЕРВ [78, 79] статистичними даними щодо безвідмовності і довговічності конкретного виду ЕРВ: експлуатаційної інтенсивності поступових відмов –  $\lambda_E$ , мінімального наробітку –  $t_{\text{Н.М.}}$ , імовірності гамма –  $\gamma$  і гамма-відсоткового ресурсу –  $T_{\gamma}$  послідовно визначаються наступні параметри «повного» DN-розподілу:

- добуток експлуатаційної інтенсивності поступових відмов на гамма-відсотковий ресурс –  $\lambda_E \times T_{\gamma}$ ;
- коефіцієнт варіації  $v$  за номограмою на рис. 2.3;

- нормована (за гамма-відсотковим ресурсом) середній наробіток до відмови  $T_{0\_DNR} / T_\gamma$  за номограмою на рис. 2.4;
- середній наробіток до відмови  $T_{0\_DNR}$ .

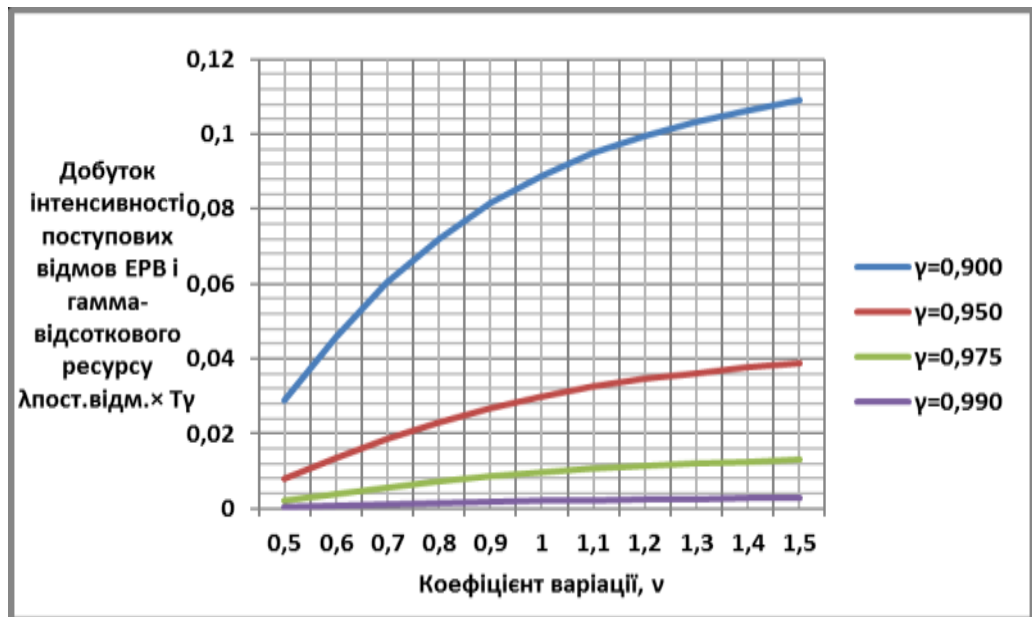


Рис. 2.3 Номограма для визначення добутку інтенсивності поступових відмов та гамма-відсоткового ресурсу EPB в залежності від коефіцієнта варіації DNR (за гамма-відсотковим ресурсом  $T_\gamma = 50000$  год і відношенні мінімального наробітку до гамма-відсоткового ресурсу  $Z = t_{\text{н.м.}} / T_\gamma = 0,5$ )

### Приклад 2.1

Визначити показники надійності металокерамічних резисторів С29В: середній наробіток на відмову та імовірність безвідмовної роботи під час використання спрощеного і повного DNR для наступних вихідних даних [79]:

- розподіл відмов - 5% раптових відмов і 95% поступових відмов;
- експлуатаційна інтенсивність відмов  $\lambda_E = 0,25 \times 10^{-6}$  1 / год;
- мінімальний наробіток  $t_{\text{н.м.}} = 25000$  год;
- гамма-відсотковий ресурс  $T_\gamma = 50000$  год за імовірності  $\gamma = 0,95$ .

А. З номограми на рис. 2.2 знаходимо значення середнього наробітку до відмови для спрощеного DNR, яке становить -  $T_{0\_DN} = 320\,000$  год.

В. Визначаємо середній наробіток до відмови повного DNR. Для цього

обчислюємо добуток інтенсивності відмов і гамма-відсоткового ресурсу металокерамічних резисторів, що становить  $\lambda_E \times T_\gamma = 0,0125$ .

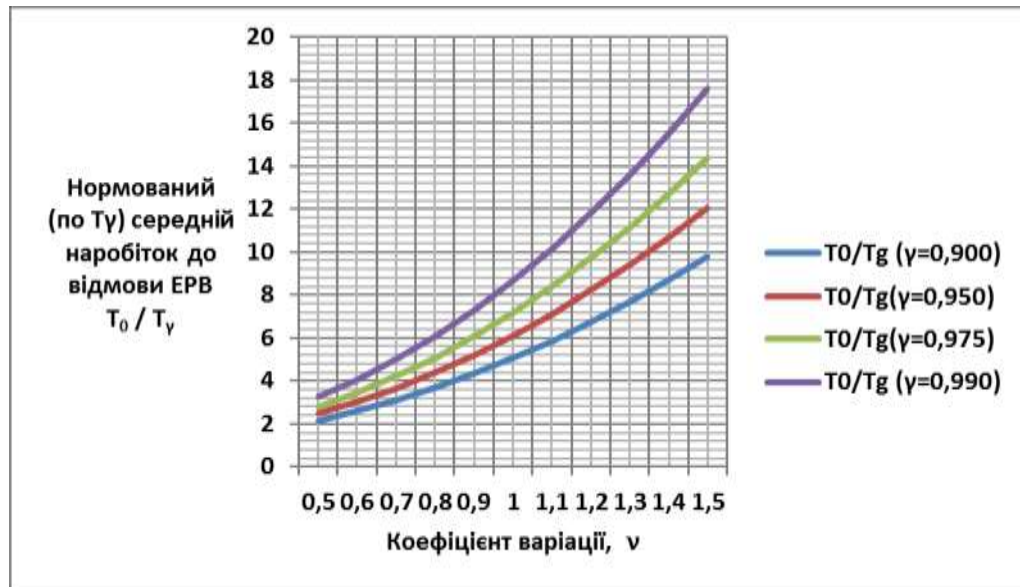


Рис. 2.4 Номограма для визначення нормованого (за гамма-відсотковим ресурсом) середнього наробітку до відмови EРВ в залежності від коефіцієнта варіації DNR (за гамма-відсотковим ресурсом  $T_\gamma = 50000$  год та відношенню мінімального наробітку до гамма-відсоткового ресурсу  $Z = t_{н.м.} / T_\gamma = 0,5$ )

За номограмою на рис. 2.3 для  $\lambda_E \times T_\gamma = 0,0125$  при  $\gamma = 0,95$  визначаємо відповідне значення коефіцієнта варіації  $\nu = 0,60$ . За номограмою на рис. 2.4 для коефіцієнта варіації  $\nu = 0,60$  знаходимо значення відношення середнього наробітку до відмови до гамма-відсоткового ресурсу металокерамічних резисторів -  $T_0 / T_\gamma = 3,025$ . Тоді середній наробіток до відмови металокерамічних резисторів під час використання повного DNR буде дорівнювати  $T_0 = 3,025 \times 50000 = 151250$  год. Порівняння значень середнього наробітку до відмови для спрощеного та повного DNR:

$$T_{0\_спр. DNR} / T_{0\_повн. DNR} = 320\ 000 / 151250 = 2,116$$

Порівняння показує, що використання спрощеної моделі DNR більш ніж у два рази перевищує значення середнього наробітку до відмови, що було отримане для повної моделі.

На рис. 2.5 – 2.6 представлені графіки імовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов металокерамічних резисторів С29В під час використання спрощеного та повного DNR.

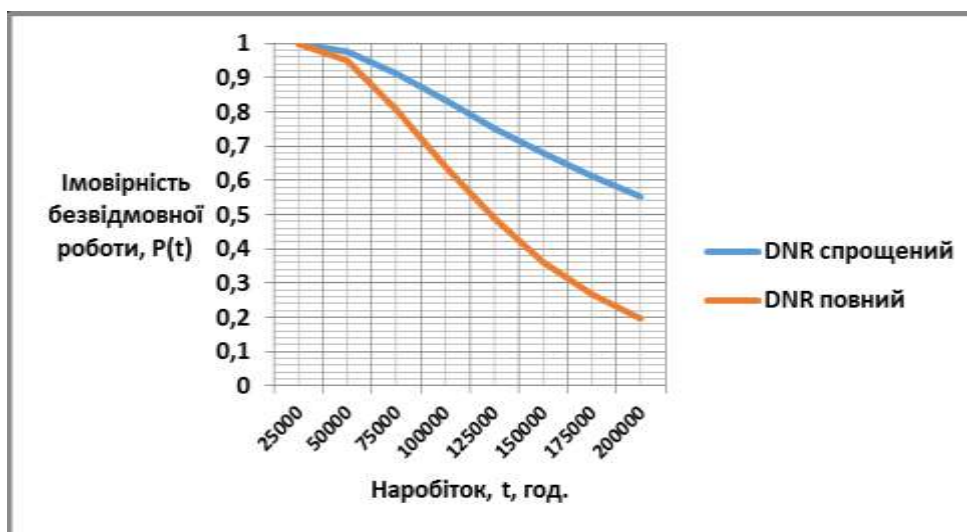


Рис. 2.5 Графіки імовірності безвідмовної роботи металокерамічних резисторів С29В під час використанні дифузійного немонотонного розподілу (синій колір для DNR спрощеного; червоний колір для DNR повного).

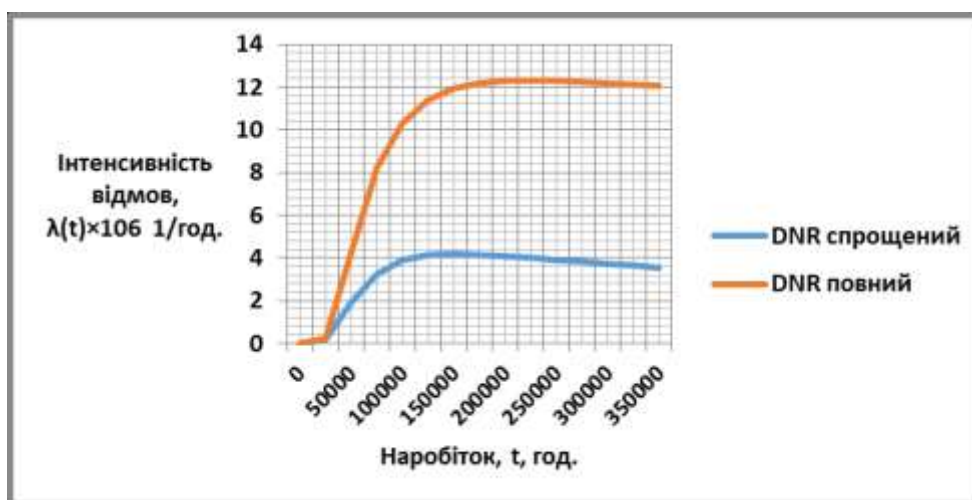


Рис. 2.6 Графіки інтенсивності відмов металокерамічних резисторів С29В під час використання дифузійного немонотонного розподілу (синій колір для DNR спрощеного; червоний колір для DNR повного).

Графіки кривих імовірності безвідмовної роботи і інтенсивності відмов резисторів С29В на рис. 2.5 і 2.6 повністю відповідають класичним кривим для



дифузійного немонотонного розподілу, які представлені у роботі професора Стрельникова [67].

## **2.4. Розроблення математичної моделі апроксимації кривої інтенсивності відмов ЕРВ, які характеризуються спільним проявом раптових і поступових відмов**

### **2.4.1 Математична модель апроксимації на основі комбінації двох розподілів: експоненціального і дифузійного немонотонного**

Імовірність безвідмовної роботи (ІБР) моделі визначається як добуток ІБР експоненціального розподілу (ER) і дифузійного немонотонного розподілу (DNR) [39, 41]:

$$P_{\text{ЕРВ}}(t) \approx P_{\text{ER} \times \text{DNR}}(t);$$

$$P_{\text{ER} \times \text{DNR}}(t) = P_{\text{ER}}(t) \times P_{\text{DNR}}(t) \quad (2.16)$$

Аналітичний вираз ІБР, щільності розподілу часу безвідмовної роботи і інтенсивності відмов для першої композиції двох моделей надійності ЕРВ представлений у табл. 2.2.

Для забезпечення досить точної апроксимації моделі надійності ЕРВ необхідне дотримання не менш як трьох обов'язкових умов (для трьох моментів часу), а саме:

$$1\text{-а умова: } t_1 = 0; P_{\text{ЕРВ\_ER} \times \text{DNR}}(t_1 = 0) = 1; \lambda_{\text{ЕРВ\_ER} \times \text{DNR}}(t_1 = 0) = \lambda_{\text{РАПТ\_ВІДМ}}. \quad (2.17)$$

$$2\text{-а умова: } t_2 = t_{\text{Н.М.}}; \lambda_{\text{ЕРВ\_ER} \times \text{DNR}}(t_2 = t_{\text{Н.М.}}) = \lambda_{\text{ПОВН\_ВІДМ.}}; \quad (2.18)$$

$$3\text{-я умова: } t_3 = T_\gamma; P_{\text{ЕРВ\_ER} \times \text{DNR}}(t_3 = T_\gamma) = \gamma \quad (2.19)$$



**Параметри композиції експоненціального і дифузійного  
немонотонного розподілу (ER×DNR)**

Характеристика розподілу	Розрахункова формула	№
	Композиція експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів (ER×DNR)	
Щільність розподілу	$f_{ER \times DNR}(t) = \exp\left\{\lambda_{РАПТ.ВІДМ.} \left[ \Phi\left(\frac{T_{0\_DNR} - t}{v\sqrt{T_{0\_DNR}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0\_DNR} + t}{v\sqrt{T_{0\_DNR}t}}\right) \right]\right\} + \frac{\sqrt{T_{0\_DNR}}}{vt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t-T_{0\_DNR})^2}{2v^2T_{0\_DNR}t}\right]$	
Модель відмов (функція розподілу)	$F_{ER \times DNR}(t) = 1 - \exp(-\lambda_{РАПТ.ВІДМ.}t) \left[ \Phi\left(\frac{T_{0\_DNR} - t}{v\sqrt{T_{0\_DNR}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0\_DNR} + t}{v\sqrt{T_{0\_DNR}t}}\right) \right]$	2.21
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$P_{ER \times DNR}(t) = \exp(-\lambda_{РАПТ.ВІДМ.}t) \left[ \Phi\left(\frac{T_{0\_DNR} - t}{v\sqrt{T_{0\_DNR}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0\_DNR} + t}{v\sqrt{T_{0\_DNR}t}}\right) \right]$	2.22
Інтенсивність відмов	$\lambda_{ER \times DNR} = \lambda_{РАПТ.ВІДМ.} + \frac{\frac{\sqrt{T_{0\_DNR}}}{vt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t-T_{0\_DNR})^2}{2v^2T_{0\_DNR}t}\right]}{\left[ \Phi\left(\frac{T_{0\_DNR} - t}{v\sqrt{T_{0\_DNR}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0\_DNR} + t}{v\sqrt{T_{0\_DNR}t}}\right) \right]}$	2.23

Для визначення середнього наробітку до відмови DN- розподілу -  $T_{0\_DNR}$  використовуються друга (2.18) і третя (2.19) умови апроксимації, тому що перша умова є умовою нормування. Далі отримаємо систему з двох нелінійних (трансцендентних) рівнянь стосовно  $T_{0\_DNR}, v$ :

$$\lambda_{ER \times DNR}(t_{н.м.}) = \lambda_{РАПТ.ВІДМ.}(t_{н.м.}) + \left. \begin{aligned} & \frac{\exp\left[-\frac{(t_{н.м.} - T_{0\_DNR})^2}{2v^2T_{0\_DNR}t_{н.м.}}\right] \frac{\sqrt{T_{0\_DNR}}}{vt_{н.м.}\sqrt{2\pi t_{н.м.}}}}{\left[ \Phi\left(\frac{T_{0\_DNR} - t_{н.м.}}{v\sqrt{T_{0\_DNR}t_{н.м.}}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0\_DNR} + t_{н.м.}}{v\sqrt{T_{0\_DNR}t_{н.м.}}}\right) \right]} \\ & \exp(-\lambda_{РАПТ.ВІДМ.}T_{\gamma}) \left[ \Phi\left(\frac{T_{0\_DNR} - T_{\gamma}}{v\sqrt{T_{0\_DNR}T_{\gamma}}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0\_DNR} + T_{\gamma}}{v\sqrt{T_{0\_DNR}T_{\gamma}}}\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Вносимо значення:

$$t_{\text{Н.М.}} = zT_{\gamma}, \quad x = \frac{T_{\gamma}}{T_{0\_DNR}}, \quad zx = \frac{t_{\text{Н.М.}}}{T_{0\_DNR}} \quad (2.25)$$

$$\lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} = \alpha_1 \lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}}, \quad \lambda_{\text{ПОСТ.ВІДМ.}} = \alpha_2 \lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} \quad (2.26)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1,00$$

Тоді система нелінійних рівнянь (2.24) спрощується таким чином:

$$\left. \begin{aligned} Y_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} T_{\gamma} &= \frac{\frac{1}{vz\sqrt{2\pi zx}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{2v^2 zx}\right]}{\alpha_2 \left[\Phi\left(\frac{1-zx}{v\sqrt{zx}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+zx}{v\sqrt{zx}}\right)\right]} \\ Y_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} T_{\gamma} &= \frac{\ln\left[\Phi\left(\frac{1-x}{v\sqrt{x}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+x}{v\sqrt{x}}\right)\right] - \ln\gamma}{\alpha_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

Прирівнюючи праві частини першого і другого рівнянь один одному з системи двох нелінійних рівнянь виходить одне рівняння:

$$\frac{\frac{1}{vz\sqrt{2\pi zx}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{2v^2 zx}\right]}{\alpha_2 \left[\Phi\left(\frac{1-zx}{v\sqrt{zx}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+zx}{v\sqrt{zx}}\right)\right]} + \frac{\left[\Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{x+1}{v\sqrt{x}}\right)\right] - \ln\gamma}{\alpha_1} = 0 \quad (2.28)$$

Це рівняння вирішується чисельними методами щодо змінної для різних значень  $v, \gamma, z, \alpha_1, \alpha_2$ . Далі за відомим значенням змінної  $x$  визначається

середній наробіток до відмови за формулою  $T_{0\_DNR} = \frac{T_{\gamma}}{x}$ .

На рис. 2.7 представлена номограма для визначення коефіцієнта варіації DNR в залежності від добутку експлуатаційної інтенсивності повних відмов ЕРВ на гамма-відсотковий ресурс за різними співвідношеннями експлуатаційної інтенсивності раптових і поступових відмов ( $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ ). На рис. 2.8 представлена номограма для визначення нормованого (за гамма-відсотковим ресурсом) наробітку до відмови ЕРВ в залежності від коефіцієнта варіації DNR.

Використовуючи номограми на рис. 2.7 і 2.8, для обраних з довідника до надійності ЕРВ статистичних даних щодо безвідмовності і довговічності конкретного виду ЕРВ [76, 79] експлуатаційної повної інтенсивності відмов –

$\lambda_E$ , співвідношеннях експлуатаційної інтенсивності раптових і поступових відмов ( $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ ), мінімального наробітку –  $t_{н.м.}$ , імовірності гамма –  $\gamma$  і гамма-відсоткового ресурсу –  $T_\gamma$  послідовно визначаються наступні параметри «повного» DN-розподілу:

- добуток експлуатаційної інтенсивності повних відмов на гамма-відсотковий ресурс –  $\lambda_E \times T_\gamma$ ;
- коефіцієнт варіації  $v$  за номограмою на рис. 2.7;
- нормована (за гамма-відсотковим ресурсом) середній наробіток до відмови  $T_{0\_DNR} / T_\gamma$  за номограмою на рис. 2.8;
- середній наробіток до відмови  $T_{0\_DNR}$ .

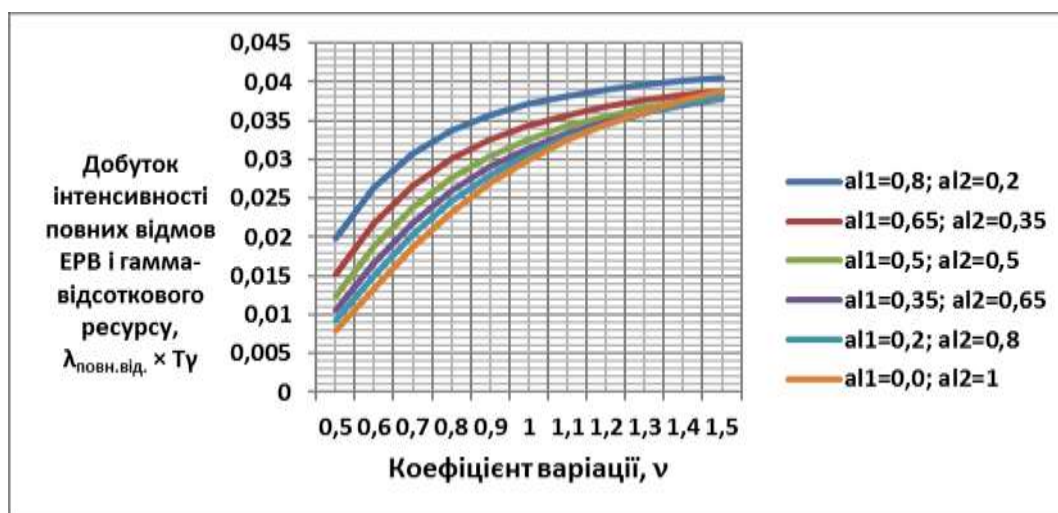


Рис. 2.7 Номограма для визначення коефіцієнта варіації в залежності від інтенсивності повних відмов ЕРВ для композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів за різними значеннями коефіцієнтів  $\alpha_1$  ( $a11$ ) і  $\alpha_2$  ( $a12$ ).

Для визначення середнього наробітку до відмови ЕРВ для композиції розподілів  $ER \times DNR$  (з урахуванням прояву раптових і поступових відмов), доцільно використовувати відому формулу:

$$T_{0_{ER \times DNR}} = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_{\text{пост.відм.}} \cdot t) \left[ \Phi \left( \frac{T_{0\_DNR} - t}{v \sqrt{T_{0\_DNR} t}} \right) - \exp \left( \frac{2}{v^2} \right) \Phi \left( - \frac{T_{0\_DNR} + t}{v \sqrt{T_{0\_DNR} t}} \right) \right] dt \quad (2.29)$$

Представлений у формулі (2.29) інтеграл можна визначити наближено:

- а) чисельними методами з використанням поліномів Лагерра;

б) вирішивши більш просте трансцендентне рівняння з використанням імовірностей безвідмовної роботи:

$$P(t = T_{0\_ER \times DNR}) = P(t = T_{0\_ER \times DNR}, T_{0\_ER}) \times P(t = T_{0\_ER \times DNR}, \nu, T_{0\_DNR}) \quad (2.30)$$

Відомо що імовірність безвідмовної роботи в момент часу, відповідний середньому наробітку до відмови, для різних розподілів має наступні значення:  $P_{ER}(t = T_{0\_ER}) = 0,3679$ ;  $P_{DNR}(t = T_{0\_DNR}, \nu = 1) = 0,3319$

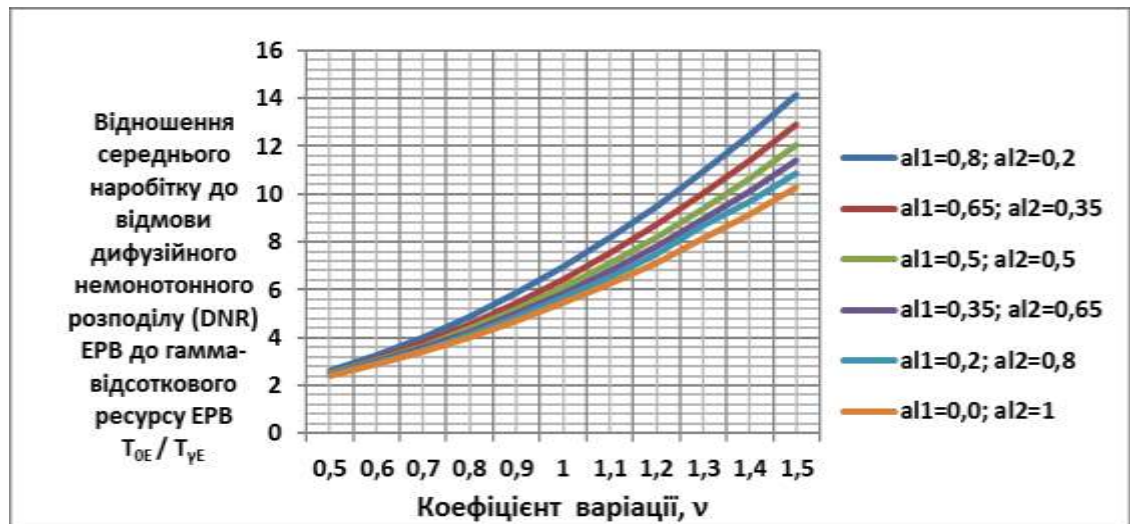


Рис. 2.8 Номограма для визначення ставлення середнього наробітку до відмови ЕРВ до гамма-відсоткового ресурсу ЕРВ для DN- розподілу в залежності від коефіцієнта варіації для композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів за різними значеннями коефіцієнтів  $\alpha_1$  (al1) і  $\alpha_2$  (al2).

Значення імовірності безвідмовної роботи для композиції розподілів ER×DNR -  $P_{ER \times DNR}(t = T_{0\_ER \times DNR}, \nu, T_{0\_ER}, T_{0\_DNR})$  буде визначатися відношенням між раптовими і поступовими відмовами цього типу ЕРВ.

Імовірності безвідмовної роботи композиції розподілів ER×DNR для моменту часу, який відповідає середньому наробітку до відмови, визначається за формулою:

$$P_{ER \times DNR}(t = T_{0\_ER \times DNR}) = P_{DNR}(\nu, t = T_{0\_DNR}) - \alpha_1 [P_{DNR}(\nu, t = T_{0\_DNR}) - P_{ER}(t = T_{0\_ER})], (2.31)$$

Оскільки  $P_{ER}(t = T_{0\_ER}) = 0,3679$ , тому рівняння (2.31) спрощується та набуває вигляду:

$$P_{ER \times DNR} (t = T_{0_{ERDNR}}) = (1 - a_1) P_{DNR}(v, t = T_{0_{DNR}}) + 0,3679a_1 \quad (2.32)$$

У табл. 2.3 представлені значення  $P_{ER \times DNR} (t = T_{0_{ERDNR}})$  в залежності від відношення раптових та поступових ЕРВ ( $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ ) для визначення середнього наробітку до відмови композиції розподілів ER × DNR

Таблиця 2.3

**Значення імовірності безвідмовної роботи  $P_{ER \times DNR}$**

$\alpha_1,$ $\alpha_2,$	$\alpha_1 = 0,0;$ $\alpha_2 = 1,0$	$\alpha_1 = 0,2;$ $\alpha_2 = 0,8$	$\alpha_1 = 0,35;$ $\alpha_2 = 0,65$	$\alpha_1 = 0,5;$ $\alpha_2 = 0,5$	$\alpha_1 = 0,65;$ $\alpha_2 = 0,35$	$\alpha_1 = 0,8;$ $\alpha_2 = 0,2$	$\alpha_1 = 1,0;$ $\alpha_2 = 0,0$
1	2	3	4	5	6	7	8
$v$	$P_{DNR}(t = T_{0_{DNR}})$	$P_{ER \times DNR} (t = T_{0_{ERDNR}})$					$P_{ER}(t = T_{0_{ER}})$
0,5	0,4056	0,39806	0,392405	0,38675	0,381095	0,3754	0,3679
0,6	0,389	0,38478	0,381615	0,37845	0,375285	0,3721	0,3679
0,7	0,3734	0,3679	0,371475	0,37065	0,369825	0,3690	0,3679
0,8	0,3587	0,36054	0,36192	0,3633	0,36468	0,3661	0,3679
0,9	0,3449	0,3495	0,35295	0,3564	0,35985	0,3633	0,3679
1,0	0,3319	0,3391	0,3445	0,3499	0,3553	0,3607	0,3679
1,1	0,3197	0,32934	0,33657	0,3438	0,35103	0,3583	0,3679
1,2	0,3083	0,32022	0,32916	0,3381	0,34704	0,3560	0,3679
1,3	0,2976	0,31166	0,322205	0,33275	0,343295	0,3538	0,3679
1,4	0,2876	0,30366	0,315705	0,32775	0,339795	0,3518	0,3679
1,5	0,2781	0,29606	0,30953	0,323	0,33647	0,34994	0,3679

На рис. 2.9 представлена номограма для обчислення нормованого (за гамма-відсотковим ресурсом) середнього наробітку до відмови ЕРВ для композиції розподілів  $ER \cdot DNR$ .

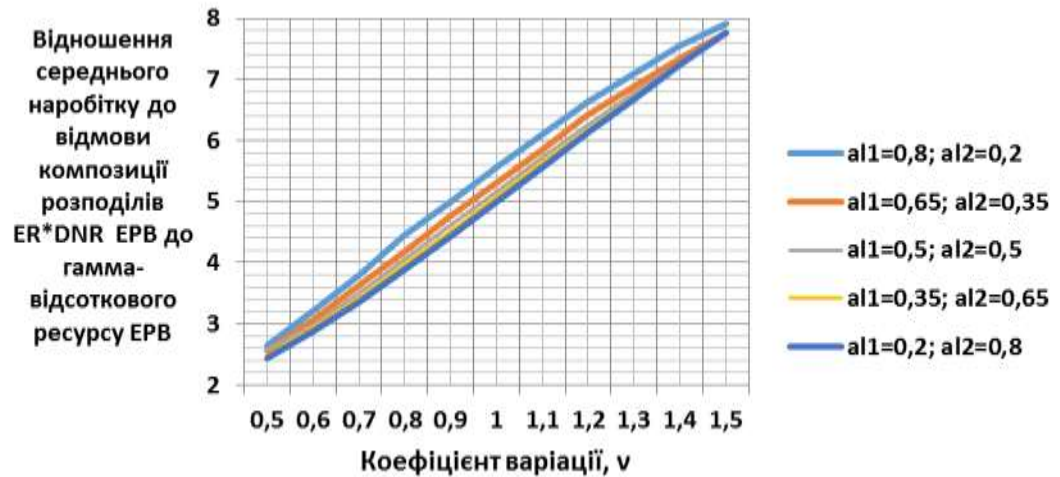


Рис. 2.9 Номограма для визначення нормованої (за гамма-відсотковим ресурсом) середнього наробітку до відмови ЕРВ для композиції розподілів  $ER \cdot DNR$  в залежності від коефіцієнта варіації за різними значеннями коефіцієнтів  $\alpha_1$  ( $\alpha_1$ ) і  $\alpha_2$  ( $\alpha_2$ ).

На рис. 2.10 представлені залежності середнього наробітку до відмови ЕРВ для  $DNR$  від коефіцієнта варіації ( $v$ ) для композиції розподілів  $ER \cdot DNR$  (за гамма-відсотковим ресурсом  $T_\gamma=50000$  год і мінімальним наробітком до гамма-відсоткового ресурсу  $t_{н.м.}/T_\gamma = 0,50$ )

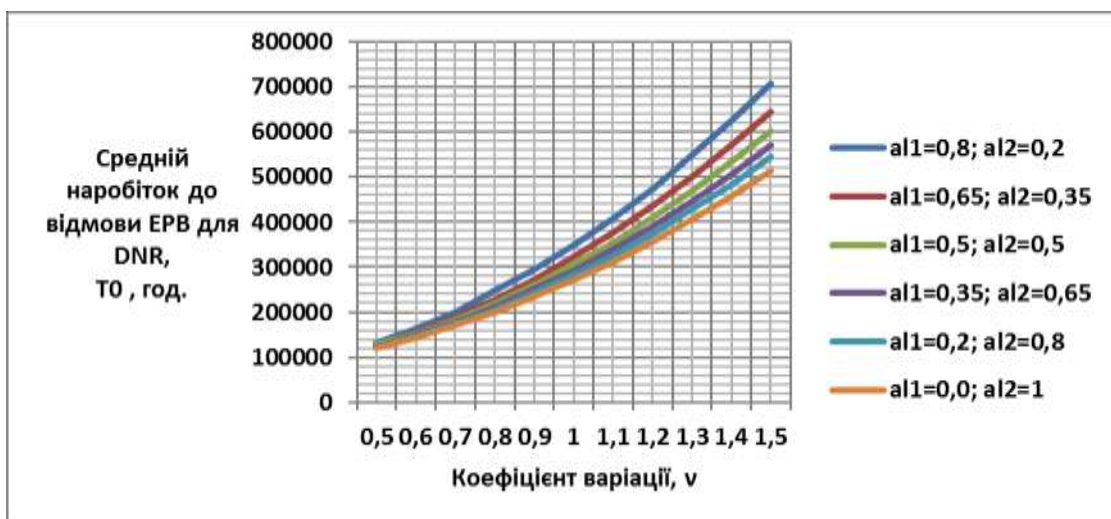




Рис. 2.10 Графіки залежностей середнього наробітку до відмови ЕРВ для DNR ( $T_0$ ) від коефіцієнта варіації ( $\nu$ ) для композиції розподілів ER×DNR (за гамма-відсотковим ресурсом  $T_\gamma = 50000$  год і відношенням мінімального наробітку до гамма-відсоткового ресурсу  $t_{н.м.}/T_\gamma = 0,5$ )

На рис. 2.11 представлені залежності інтенсивності повних відмов ЕРВ від коефіцієнта варіації для композиції розподілів ER×DNR:  $P_{ER \cdot DNR}(t) = P_{ER}(t) \times P_{DNR}(t)$  (за гамма-відсотковим ресурсом  $T_\gamma = 50\,000$  год і відношенням мінімального наробітку до гамма-відсоткового ресурсу  $t_{н.м.}/T_\gamma = 0,5$ ).

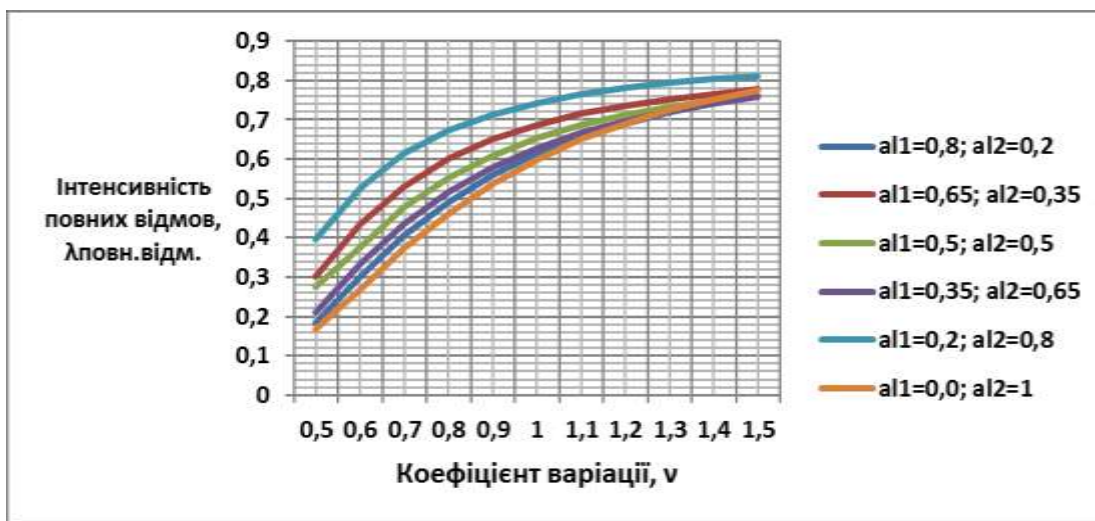


Рис. 2.11 Графіки залежностей інтенсивності повних відмов ЕРВ ( $\lambda_{повн.відм.}$ ) від коефіцієнта варіації ( $\nu$ ) для композиції розподілів ER×DNR:  $P_{ER \cdot DNR}(t) = P_{ER}(t)P_{DNR}(t)$  (за гамма-відсотковим ресурсом  $T_\gamma = 50\,000$  год. і відношенням мінімального наробітку до гамма-відсоткового ресурсу  $t_{н.м.}/T_\gamma = 0,5$ )

На рис. 2.12 представлені залежності середнього наробітку до відмови ЕРВ для композиції ER×DNR від коефіцієнта варіації за будь-якими значеннями коефіцієнтів  $\alpha_1$  ( $a_1$ ) і  $\alpha_2$  ( $a_2$ ) для гамма-відсоткового ресурсу  $T_\gamma = 50\,000$  год.

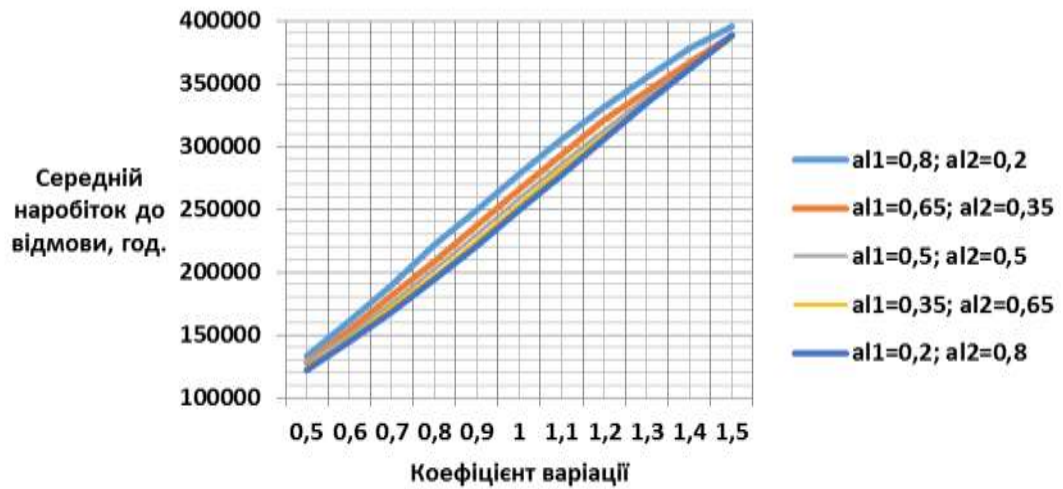


Рис. 2.12 Графік залежності середнього наробітку до відмови ЕРВ для композиції розподілів  $ER \times DNR$  від коефіцієнта варіації за різними значеннями коефіцієнтів  $\alpha_1$  ( $a_{11}$ ) і  $\alpha_2$  ( $a_{12}$ ) для гамма-відсоткового ресурсу  $T_\gamma = 50\,000$  год.

### Приклад 2.2

Побудувати графіки інтенсивності відмов НВЧ транзистора 2Т9124А за використанням в якості математичної моделі композиції розподілів  $ER \times DNR$  [77, 81]:

#### *а) Вихідні дані:*

- температура навколишнього середовища -  $t_{н.ср.} = 50^\circ\text{C}$ ;
- група жорсткості умов експлуатації - 2.3;
- базова (групова інтенсивність відмов) -  $\lambda_{бсг} = 0,21 \times 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ ;
- розподіл відмов 35% раптових ( $\alpha_1 = 0,35$ ) і 65% поступових ( $\alpha_2 = 0,65$ ) відмов;
- максимальна допустима за ТУ температура навколишнього середовища або корпусу під час мінімального навантаження -  $t_{пер.макс.} = 150^\circ\text{C}$ ;
- максимальна температура навколишнього середовища, для якої при 100% електричного навантаження температура переходу не перевищує максимально допустиму  $t_{пер.макс.} - t_{зниж.} = 75^\circ\text{C}$ ;
- мінімальний наробіток -  $T_{н.м.} = 25000$  год;
- гамма-відсотковий ресурс -  $T_\gamma = 50000$  год за імовірності  $\gamma = 0,95$ ;



- температура переходу -  $t_{пер.} = 100^{\circ}\text{C} + t_{н.сер.}$

- математична модель для розрахунку інтенсивності відмов має вигляд:

$$\lambda_E = \lambda_{бсг} \times K_T \times K_f \times K_{\phi} \times K_{Пр} \times K_E$$

*б) Розрахунок коефіцієнтів математичної моделі*

Визначення температурного коефіцієнта:

$$K_T = 0,08 \times (t_{пер.} - 75) \times (U_{роб.} / U_{макс.} - 0,35); \quad U_{роб.} / U_{макс.} = 0,65;$$

де  $U_{роб.}$  - прикладена напруга;

$U_{макс.}$  - максимально допустима за ТУ напруга колектор-емітер;

$$K_T = 0,08 \times (150 - 75) \times (0,65 - 0,35) = 1,80;$$

Значення коефіцієнтів  $K_T = 1,80$ ;  $K_f = 1$ ;  $K_{\phi} = 0,25$ ;  $K_{Пр} = 1$ ;  $K_E = 8$  отримані з довідника щодо надійності ЕРВ [76, 79].

Розрахункове значення експлуатаційної інтенсивності НВЧ транзистора 2Т9124А:

$$\lambda_E = 0,21 \times 10^{-6} \times 1,8 \times 1,0 \times 0,25 \times 1,0 \times 8,0 = 0,756 \times 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

*в) Визначення параметрів математичної моделі надійності з використанням композиції розподілів ER × DNR [ 39, 44]*

1) визначаємо добуток  $\lambda_{повн.відх} \times T_{\gamma} = 0,756 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^4 = 0,0378$ ;

2) за номограмою на рис. 2. знаходимо, що  $\lambda_{повн.відх} \times T_{\gamma} = 0,0378$  за

$\alpha_1 = 0,35$  і  $\alpha_2 = 0,65$  відповідає коефіцієнт варіації  $\nu = 1,5$ ;

3) за номограмою на рис. 2.7 знаходимо значення нормованого (за гамма-відсотковим ресурсом) середнього наробітку до відмови DN - розподілу -  $T_{0\_DNR} / T_{\gamma} = 11,42$ ;

4) за номограмою на рис.2.8 знаходимо значення нормованого (за гамма-відсотковим ресурсом) середнього наробітку до відмови композиції розподілів: ER × DNR -  $T_{0\_ER \times DNR} / T_{\gamma} = 7,73$ ;

5) визначаємо значення середнього наробітку до відмови за гамма-відсотковим ресурсом  $T_{\gamma} = 50000$  год для DN - розподілу:

$T_{0\_DNR} = 571000$  год і композиції розподілів ER × DNR:

$T_{0\_ER \times DNR} = 386500$  год.

На рис. 2.13 представлені значення інтенсивності відмов: для ER-розподілу (фіолетовий колір) і для композиції розподілів ER×DNR: раптових відмов (зелений колір), поступових відмов (блакитний колір) і повних відмов (червоний колір).

З рис. 2.13 видно, що в момент часу, що відповідає 150 000 год інтенсивність повних відмов досягає максимуму, а потім поступово зменшується.

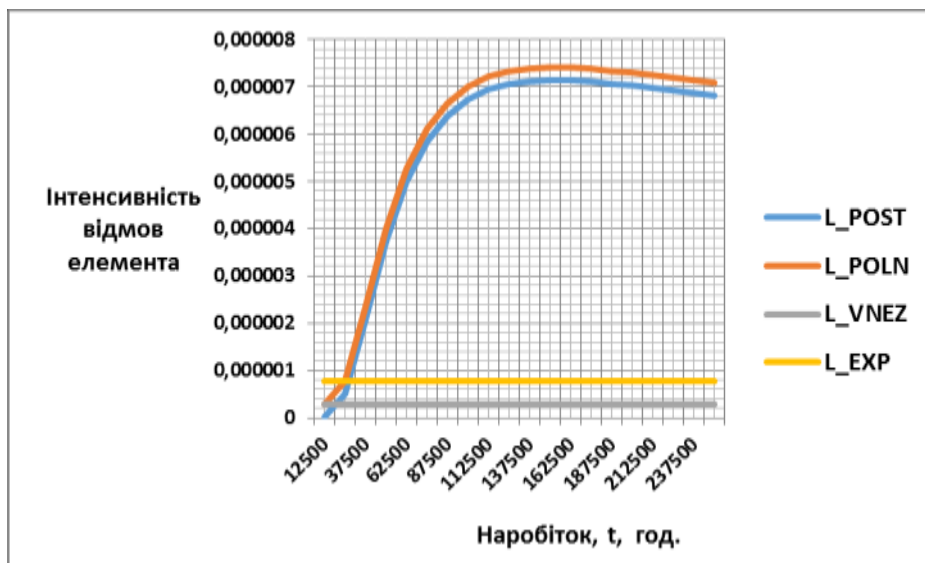


Рис. 2.13. Графіки інтенсивності відмов НВЧ транзистора 2Т9124А для композиції розподілів ER×DNR

#### 2.4.2 Математична модель апроксимації інтенсивності відмов електрорадіовиробів з використанням композиції двох розподілів: експоненціального і нормального

Імовірність безвідмовної роботи (ІБР) моделі надійності визначається як добуток ІБР експоненціального розподілу (ER) і нормального розподілу (NR) [38, 39]:

$$P_{EPB}(t) \approx P_{ER \times NR}(t);$$

$$P_{ER \times NR}(t) = P_{ER}(t) \times P_{NR}(t) \quad (2.33)$$

Аналітичний вираз ІБР, щільності розподілу та інтенсивності відмов для третьої моделі надійності ЕРВ представлені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

**Параметри композиції експоненціального і усіченого нормального розподілів (ER×NR)**

Характеристика розподілу	Розрахункова формула	
1	2	3
<i>Композиція експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів (ER*NR)</i>		
Щільність розподілу	$f_{ER \times NR}(t) = \exp(-\lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} t) \left\{ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-T_{0\_NR})^2}{2\sigma^2}\right] + \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} \left[1 - \Phi\left(\frac{t-T_{0\_NR}}{\sigma}\right)\right] \right\}$	
Модель відмов (функція розподілу)	$F(t) = 1 - \exp(-\lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} t) \left[1 - \Phi\left(\frac{t-T_{0\_NR}}{\sigma}\right)\right]$	2.35
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$P_{ER \times NR}(t) = \exp(-\lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} t) \left[1 - \Phi\left(\frac{t-T_{0\_NR}}{\sigma}\right)\right]$	2.36
Інтенсивність відмов	$\lambda_{ER \times NR}(t) = \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} + \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-T_{0\_NR})^2}{2\sigma^2}\right]}{1 - \Phi\left(\frac{t-T_{0\_NR}}{\sigma}\right)},$ де: $\sigma = \sqrt{T_{0\_NR}}$ при $t \rightarrow \infty \lim \lambda_{ER \times NR}(t) = \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} + \frac{1}{2T_{0\_DNR}v^2}$	2.37

Для забезпечення досить точної апроксимації моделі надійності ЕРВ необхідно дотримання не менше трьох обов'язкових умов (для трьох моментів часу), а саме:

$$1\text{-а умова: } t_1 = 0; P_{ЕРВ\_ЕР \times NR}(t_1 = 0) = 1; \lambda_{ЕРВ\_ЕР \times NR}(t_1 = 0) = \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} \quad (2.38)$$

$$2\text{-а умова: } t_2 = t_{Н.М.}; \lambda_{ЕРВ\_ЕР \times NR}(t_2 = t_{Н.М.}) = \lambda_{ПОВН\_ВІДМ.}; \quad (2.39)$$

$$3\text{-я умова: } t_3 = T_\gamma; P_{ЕРВ\_ЕР \times NR}(t_3 = T_\gamma) = \gamma. \quad (2.40)$$

Для визначення середнього наробітку до відмови DNR  $-T_{0\_DNR}$  використовують другу (2.39) і третю (2.40) умови апроксимації, оскільки перша умова є умовою нормування.

Далі отримаємо систему з двох нелінійних (трансцендентних) рівнянь відносно  $T_{0\_DNR}, \nu$ :

$$\left. \begin{aligned} \exp(-\lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} T_{\lambda}) &= \frac{\gamma}{1 - \phi\left(\frac{T_{\gamma} - T_{0\_NR}}{\sigma}\right)} \\ \lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} &= \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{\text{Н.М.}} - T_{0\_NR})^2}{2\sigma^2}\right]}{1 - \phi\left(\frac{T_{\gamma} - T_{0\_NR}}{\sigma}\right)} + \lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

$$\text{де } \sigma = \nu T_{0\_NR}, \quad \nu = 0,25$$

Внесемо значення:

$$t_{\text{Н.М.}} = z T_{\gamma}, \quad x = \frac{T_{\gamma}}{T_{0\_NR}}, \quad zx = \frac{t_{\text{Н.М.}}}{T_{0\_NR}} \quad (2.42)$$

$$\lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} = \lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} + \lambda_{\text{ПОСТ.ВІДМ.}} \quad (2.43)$$

Помножимо перше рівняння системи ( 2.41 ) на  $T_{\gamma}$  .

Внаслідок цього система нелінійних рівнянь (2.41) спрощується і має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} &= -\frac{1}{T_{\gamma}} \ln \frac{\gamma}{1 - \phi\left(\frac{T_{\gamma}}{\nu T_{0\_NR}} - \frac{1}{\nu}\right)}, \\ \lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} T_{\gamma} &= \frac{\frac{T_{\gamma}}{\nu T_{0\_NR} \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{\left(\frac{t_{\text{Н.М.}}}{T_{0\_NR}} - 1\right)^2}{2\nu^2}\right]}{1 - \phi\left(\frac{T_{\gamma}}{\nu T_{0\_NR}} - \frac{1}{\nu}\right)} + \lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} T_{\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

Підставляємо  $x = \frac{T_{\gamma}}{T_{0\_NR}}$  після чого система рівнянь (2.44) ще більше

спрощується, та буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} &= -\frac{1}{T_\gamma} \ln \frac{\gamma}{1 - \Phi\left(\frac{x-1}{\nu}\right)}, \\ \lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} T_\gamma &= \frac{\frac{x}{\nu\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{2\nu^2}\right]}{1 - \Phi\left(\frac{zx-1}{\nu}\right)} + \lambda_{\text{РАПТ.ВІДМ.}} T_\gamma \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

Підставивши з першого рівняння системи (2.45) значення  $\lambda_{\text{рапт.відм.}}$  у друге рівняння маємо вираз:

$$\lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} T_\lambda = \frac{\frac{x}{\nu\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{2\nu^2}\right]}{1 - \Phi\left(\frac{zx-1}{\nu}\right)} - \ln \frac{\gamma}{1 - \Phi\left(\frac{x-1}{\nu}\right)} \quad (2.46)$$

Приймаючи значення коефіцієнта варіації нормального розподілу  $\nu = 0,25$  отримуємо більш просте рівняння:

$$\lambda_{\text{ПОВН.ВІДМ.}} T_\gamma = \frac{\frac{x}{0,25\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(zx-1)^2}{0,125}\right]}{1 - \Phi\left(\frac{zx-1}{0,25}\right)} - \ln \frac{\gamma}{1 - \Phi\left(\frac{x-1}{0,25}\right)} \quad (2.47)$$

Це рівняння вирішується численними методами відносно змінної для різних значень  $\gamma, z, T_\gamma, \lambda_{\text{повн.відм.}}$ . Далі за відомим значенням змінної  $x$  визначається середній наробіток до відмови за формулою  $T_{0\_NR} = \frac{T_\gamma}{x}$ . Таким чином, за відомими значеннями довідникових даних для ЕРВ [77-81]:  $\lambda_{\text{повн.відм.}}, \gamma, T_\gamma, t_{\text{н.м.}}, \nu$  визначається значення середнього наробітку до відмови нормального розподілу -  $T_{0\_NR}$ .

На рис. 2.14 представлена номограма для визначення інтенсивностей повних, раптових і поступових відмов в залежності від ставлення гамма-відсоткового ресурсу ЕРВ до середнього наробітку до відмови усіченого нормального розподілу для композиції розподілів: ER × NR

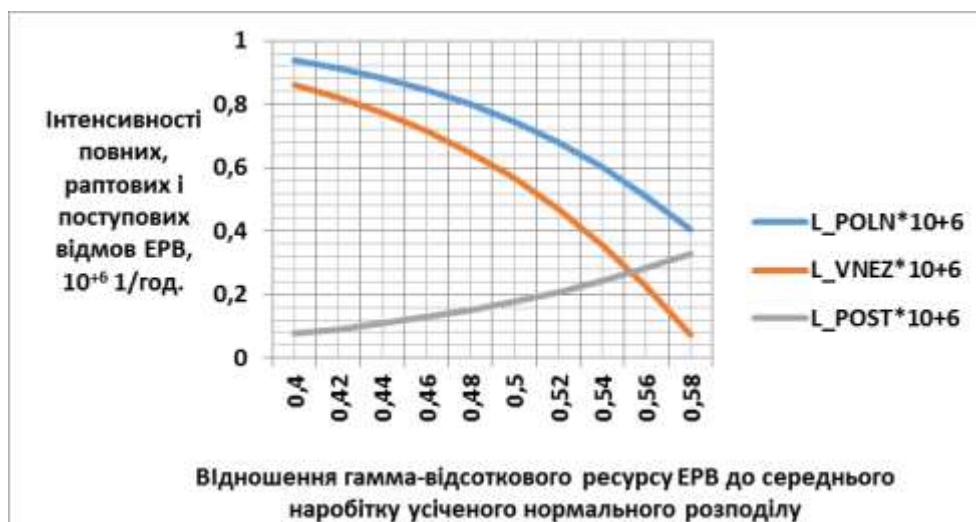


Рис. 2.14 Номограма визначення інтенсивностей повних, раптових і поступових відмов в залежності від ставлення гамма-відсоткового ресурсу ЕРВ до середнього наробітку до відмови усіченого нормального розподілу для композиції розподілів: ER × NR

На рис. 2.15 представлені графіки середнього наробітку до відмови усіченого нормального розподілу (NR - синій колір) для композиції розподілів: ER × NR

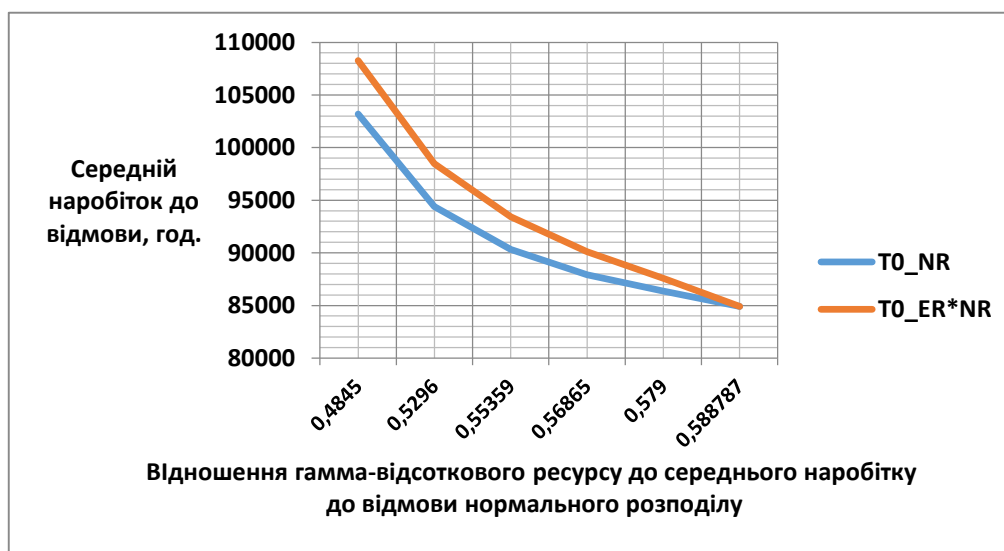


Рис. 2.15 Графіки середнього наробітку до відмови усіченого нормального розподілу (NR - синій колір) для композиції розподілів: ER × NR

### 2.4.3 Математична модель апроксимації інтенсивності відмов ЕРВ з використанням композиції двох розподілів: експоненціального та Вейбулла

Імовірність безвідмовної роботи (ІБР) моделі надійності визначається як добуток ІБР експоненціального розподілу (ER) і розподілу Вейбулла (WR) [38, 39]:

$$P_{EPB}(t) \approx P_{ER \times WR}(t) \quad (2.48)$$

$$P_{ER \times WR}(t) = P_{ER}(t) P_{WR}(t)$$

Аналітичні вирази ІБР, щільності розподілу і інтенсивності відмов для четвертої моделі надійності ЕРВ представлені у табл. 2.5.

Таблиця 2.5

#### Показники надійності для композиції експоненціального і розподілу Вейбулла

Характеристика розподілу	Розрахункова формула	
<i>Композиція експоненціального і розподілу Вейбулла (ER × NR)</i>		
Щільність розподілу	$f_{ER \times WR} = \left[ \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} + \frac{b}{a} \left( \frac{t}{a} \right)^{b-1} \right] \exp \left\{ - \left[ \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} t + \left( \frac{t}{a} \right)^b \right] \right\}$	2.49
Модель відмов (функція розподілу)	$F_{ER \times DR}(t) = 1 - \exp(-\lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} t) \exp \left[ - \left( \frac{t}{a} \right)^b \right]$	2.50
Модель надійності (імовірність безвідмовної роботи)	$P_{ER \times DR}(t) = \exp(-\lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} t) \exp \left[ - \left( \frac{t}{a} \right)^b \right]$	2.51
Інтенсивність відмов	$\lambda_{ER \times WR} = \left[ \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} + \frac{b}{a} \left( \frac{t}{a} \right)^{b-1} \right]$	2.52

Для забезпечення досить точної апроксимації моделі надійності ЕРВ необхідно дотримання не менше як трьох обов'язкових умов (для трьох моментів часу), тобто повинні забезпечити виконання наступних умов:

$$1\text{-а умова: } t_1 = 0; P_{ЕРВ\_ЕР \times WR}(t_1 = 0) = 1; \lambda_{ЕРВ\_ЕР \times WR}(t_1 = 0) = \lambda_{ПОСТ\_ВІДМ.} \quad (2.53)$$

$$2\text{-а умова: } t_2 = t_{Н.М.}; \lambda_{ЕРВ\_ЕР \times WR}(t_2 = t_{Н.М.}) = \lambda_{ПОВН\_ВІДМ.}; \quad (2.54)$$

$$3\text{-я умова: } t_3 = T_\gamma; P_{ЕРВ\_ЕР \times WR}(t_3 = T_\gamma) = \gamma \quad (2.55)$$

Для визначення середнього наробітку до відмови,  $DNR - T_{0\_DNR}$  використовується друга (2.54) та третя (2.55) умова апроксимації, оскільки перша умова є умовою нормування.

За цим, отримаємо систему з двох нелінійних (трансцендентних) рівнянь:  $T_{0\_WR}$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} + \lambda_{ПОСТ\_ВІДМ.} &= \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} + \frac{b}{a} \left( \frac{t_{Н.М.}}{a} \right)^{b-1} \\ \gamma &= \exp \left\{ - \left[ \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} t_\gamma + \left( \frac{t_\gamma}{a} \right)^b \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.56)$$

З другого рівняння виводиться формула для обчислення змінної  $a$  :

$$a = \frac{T_\gamma}{[-(\ln \gamma + \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} T_\gamma)]^{1/b}} \quad (2.57)$$

Підставляючи значення зміни  $a$  у перше рівня отримуємо рівняння з однією змінною – параметром  $b$

$$b \left( \frac{t_{Н.М.}}{T_\gamma} \right)^b = - \frac{\lambda_{ПОСТ\_ВІДМ.} t_{Н.М.}}{\ln \gamma + \lambda_{РАПТ\_ВІДМ.} T_\gamma} \quad (2.58)$$

Після визначення змінної і параметром обчислюється середній наробіток до відмови, середньоквадратичне відхилення і коефіцієнт варіації розподілу Вейбулла:

$$\begin{aligned} T_{0\_WR} &= a K_b, \delta = a C_b, \\ \text{де: } K_b &= \Gamma \left( 1 + \frac{1}{b} \right), C_b^2 = \Gamma \left( 1 + \frac{2}{b} \right) - K_b^2, v = \frac{C_b}{K_b}, \end{aligned} \quad (2.59)$$



$\Gamma(1 + \frac{1}{b})$  - гамма – функція [77]

У таблиці 2.6 представлені дані для 4-х прикладів використання композиції розподілів ER×WR:

- значення інтенсивності раптових, поступових і повних відмов ЕРВ (вихідні дані);

- гамма-відсотковий ресурс ЕРВ;

- параметри  $a$  і  $b$  розподілу Вейбулла;

- значення середнього наробітку до відмови моделей надійності:

Вейбулла (WR) і композиції розподілів (ER×WR).

Таблиця 2.6

### Показники надійності і параметри композиції розподілів ER×WR

Вихідні дані				Параметри композиції розподілів ER×WR			
$T_{\gamma}$	$\lambda_{\text{повн. відм.}}$	$\lambda_{\text{пост. відм.}}$	$\lambda_{\text{рапт. відм.}}$	$b$	$a$	$T_{0\_WR}$	$T_{0\_ER \times WR}$
50000	4,031E-07	3,291E-07	7,401E-08	4,1273	112774	102387	107294
50000	5,4038E-07	2,7019E-07	2,7019E-07	4,7237	100035	91562	95127
50000	6,784E-07	2,087E-07	4,696E-07	5,40294	90365	83344	86035
50000	7,9881E-07	1,5176E-07	6,471E-07	6,14556	83211,1	77295	79394

### 2.5 Приклад використання композиції розподілів для побудови апроксимації інтенсивності відмов потужних НВЧ транзисторів

Застосовуючи методи і формули, наведені у розділі 2.4 визначені показники надійності НВЧ транзисторів великої потужності за вихідними даними Довідника щодо надійності ЕРВ і ТУ [77-81]:

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

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

$$\lambda_{\text{ПОСТ\_ВІДМ.}} = 0,270 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{ГОД}}$$

Для експоненціальної і трьох композиційних моделей надійності: ER×NR, ER×WR, ER×DNR. На рис. 2.16 представлені графіки імовірності безвідмовної роботи НВЧ транзисторів. У табл. 2.7 представлені значення середнього наробітку до відмови потужних НВЧ транзисторів для експоненціального і трьох композиційних моделей надійності: ER×NR, ER×WR, ER×DNR.

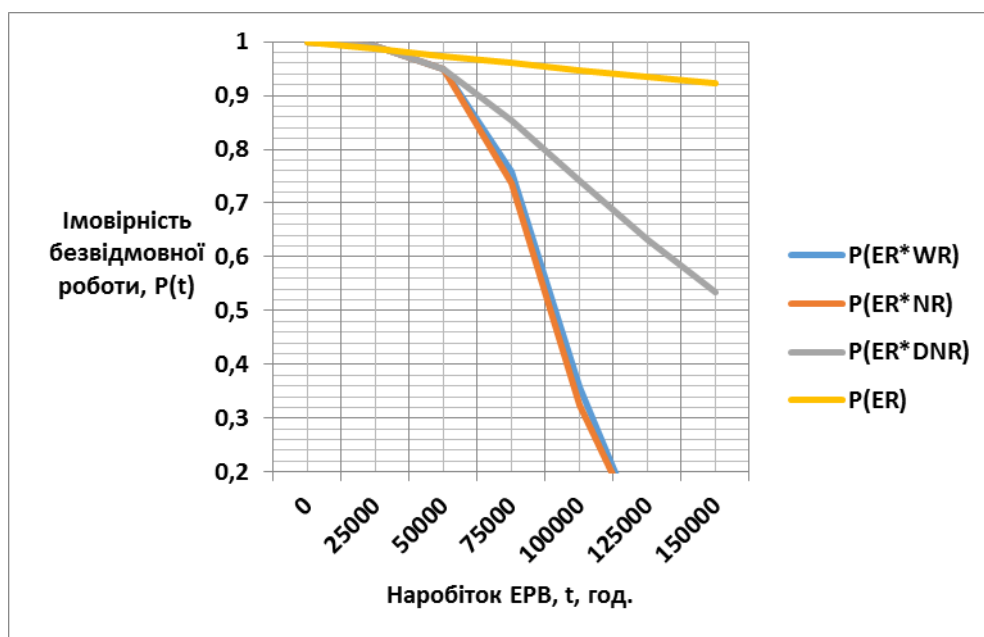


Рис. 2.16 Імовірність безвідмовної роботи НВЧ транзисторів ( $\lambda_{\text{РАПТ\_ВІДМ.}} = 0,390 \times 10^{-6} \text{ 1/год}$ ;  $\lambda_{\text{ПОСТ\_ВІДМ.}} = 0,479 \times 10^{-6} \text{ 1/год.}$ ) для різних моделей відмов (експоненціального розподілу - фіолетовий колір; добутки імовірностей експоненціального і дифузійного немонотонного розподілу - зелений колір; добутки імовірностей експоненціального і нормального розподілу - червоний колір; добутки імовірностей експоненціального і розподілу Вейбулла - синій колір)

Таблиця 2.7

### Характеристики надійності потужних НВЧ транзисторів

Тип математичної моделі надійності EPB	Середній наробіток до настання поступової відмови, год.	Середній наробіток до настання раптової відмови, год.	Середній наробіток до настання раптової або поступової відмов, год
Експоненціальний розподіл (ER)	-	185325	-
Композиція розподілів ER*DNR	218835	370650	202771
Композиція розподілів ER*WR	90320	370650	93431
Композиція розподілів ER*NR	91562	370650	95127

На рис. 2.17 представлені графіки інтенсивності відмов потужних НВЧ транзисторів.

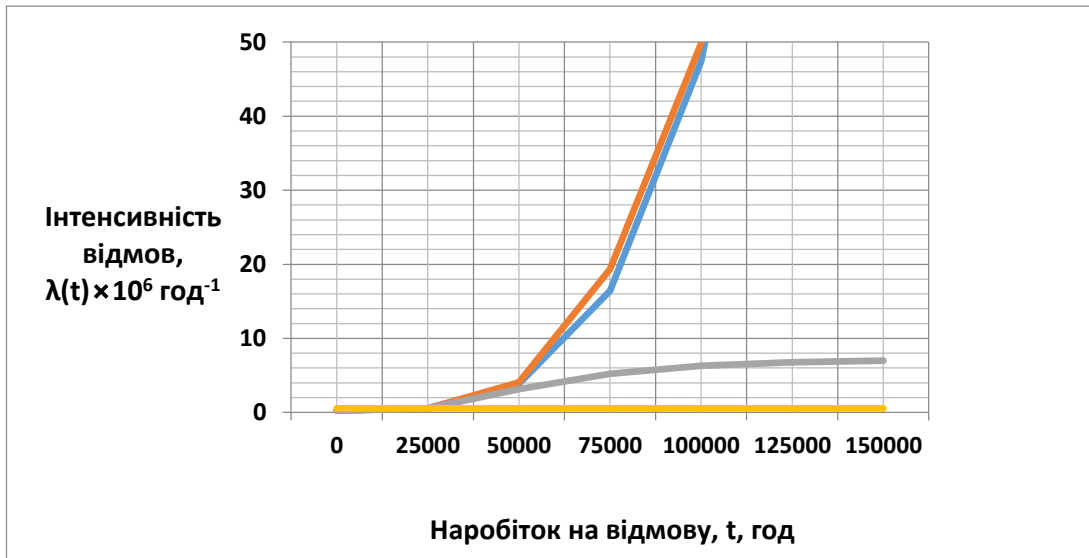


Рис. 2.17 Інтенсивність відмов НВЧ транзисторів ( $\lambda_{\text{повн.відм.}} = 0,540 \times 10^{-6}$  1/год;  $\lambda_{\text{рапт.відм.}} = 0,270 \times 10^{-6}$  1/год;  $\lambda_{\text{пост.відм.}} = 0,270 \times 10^{-6}$  1/год) для різних моделей надійності: експоненціального розподілу ( $\lambda_{\text{повн.відм.}} = 0,540 \times 10^{-6}$  1/год) - фіолетовий колір; композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілу - зелений колір; композиції експоненціального і нормального розподілу - червоний колір; композиції експоненціального і розподілу Вейбулла - синій колір)

Порівняльний аналіз характеристик надійності потужних НВЧ транзисторів при використанні різних композиційних моделей надійності показав що:

- графіки імовірності безвідмовної роботи і інтенсивності відмов для математичних моделей надійності: ER×NR і ER×WR практично збігаються;
- середній наробіток до відмови для композиції розподілів ER×NR і ER×WR практично збігаються;
- інтенсивність відмов для математичних моделей надійності: ER×NR, ER×WR і ER×DNR на інтервалі від нуля до гамма-відсоткового ресурсу збігаються;
- найбільш оптимальним для апроксимації інтенсивності відмов ЕРВ за довідниковими даними є композиція розподілів ER×DNR.

### Висновки до другого розділу

1. Вперше розроблені та досліджені математичні моделі апроксимації кривої інтенсивності раптових і поступових відмов ЕРВ з впровадженням дифузійного немонотонного розподілу, розподілу Вейбулла, нормального розподілу і композиції дифузійного немонотонного і експоненціального розподілів.

2. Запропоновані у розділі 2 моделі апроксимації інтенсивності відмов ЕРВ - композиції  $EP \times VP$  і  $EP \times ДНР$  у початковий період часу, який визначаються мінімальним наробітком, є найбільш ефективними (за значенням імовірності безвідмовної роботи) порівняно з експоненціальним розподілом (модель  $EP$ ) і дифузійним немонотонним розподілом (ДНР).

3. Запропоновані математичні моделі апроксимації кривих інтенсивностей ЕРВ з використанням експоненціального та розподілу Вейбулла, експоненціального та дифузійного немонотонного розподілів дозволяють побудувати нові математичні моделі надійності радіоелектронної апаратури, що враховують раптові і поступові відмови ЕРВ.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ З АКТИВНИМИ ФАЗОВАНИМИ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ

### 3.1. Постановка завдань

У цьому розділі представлені дослідження впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності радіоелектронних систем з надмірністю. Були побудовані однорівневі і дворівневі структурні схеми надійності АФАР та розроблені і досліджені моделі оцінки надійності АФАР з однорівневою і дворівневою структурними схемами надійності.

До того ж у розділі 3 були розроблені та досліджені моделі надійності антенної підрешітки і АФАР у цілому під час спільного прояву раптових і поступових відмов приймально-передавальних каналів (ППК) з використанням відомих розподілів відмов ППК – експоненціального (ER), Вейбулла (WR), дифузійного немонотонного (DNR) і композиції розподілів – ER×DNR. Окрім цього у даному розділі були розроблені та досліджені математичні моделі залежності показників надійності АФАР РС від температури активної зони кристала нітрид-галієвих транзисторів і мікросхем випромінюючих каналів.

### 3.2 Дослідження впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності радіоелектронних систем з надмірністю

#### *Загальні положення*

Підвищення ефективності та надійності радіоелектронних систем за рахунок застосування резервування (додаткової надмірності) у структуру системи важлива та актуальна проблема. Одним із широко застосованих методів є резервування систем із загальним навантаженим резервуванням з дробовою кратністю [35, 51, 75, 83].

Дослідження впливу надмірності на резервовані системи з дробовою кратністю представляє технічний інтерес та має велику практичну значимість.

Рішенню цієї проблеми присвячена велика кількість праць [50-53, 71, 74]. Незважаючи на вплив коефіцієнта надмірності на показники надійності, дослідження були проведені тільки в резервованій системі елементів за експоненціальним законом розподілу часу безвідмовної роботи.

#### *Мета роботи та постановка завдання*

Мета роботи – дослідження впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності резервованих систем з дробовою кратністю за різними законами розподілу часу безвідмовної роботи елементів системи: експоненціальним, Вейбулла, дифузійним немонотонним, узагальненим показовим та суміші розподілів експоненціального та Вейбулла.

#### *Вирішення завдання*

Під час застосування теореми складання несумісних подій, для випадку однакових елементів системи із загальним навантаженим резервуванням з дробовою кратністю маємо наступний вираз для імовірності безвідмовної роботи:

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{N \times K_{надм}} C_N^i (P(t))^{N-i} (1 - P(t))^i, \quad (3.1)$$

де  $P(t)$  – імовірність безвідмовної роботи одного елемента;

$C_N^i$  - число поєднання із  $N$  елементів за  $i$ ;

$N = n + m$  - загальне число елементів у резервованій системі;

$n$  - число основних елементів;

$m$  - число резервних елементів;

$K_{надм.} = m/N$  - під коефіцієнтом надмірності резервованої системи (під

час загального резервування системи з дробовою кратністю) розуміється відношення числа резервованих (надмірних) елементів системи  $m$  до загальної кількості елементів в системі  $N$ .

Дослідження залежності надійності РС із загальним навантаженим резервуванням з дробовою кратністю від коефіцієнта надмірності системи за

різними законами розподілу часу безвідмовної роботи елементів, що враховують випадкові та поступові відмови елементів: експоненціального, Вейбулла, дифузійного немонотонного, узагальненого показового та суміші розподілів експоненціального і Вейбулла.

Експоненціальний розподіл часу безвідмовної роботи (однопараметричний – параметр  $\lambda$ ) враховує випадкові відмови системи у період нормальної експлуатації системи. Інтенсивність відмов елемента  $\lambda$  – стала, не враховує зношення та старіння у процесі експлуатації.

Розподіл Вейбулла часу безвідмовної роботи (двопараметричний – параметри  $\lambda$  та  $k$ ) застосовується під час опису працездатності систем у процесі зношення та старіння.

Дифузійний немонотонний розподіл (ДНР) часу безвідмовної роботи (двопараметричний – параметри  $a$  та  $v$ ) застосовується для елементів, у яких відомі фізичні процеси деградації, що призводять до відмов у процесі експлуатування та встановлені визначаючі параметри, що характеризують технічний стан об'єктів [5, 16, 19, 65].

Узагальнений показовий розподіл (УПР) часу безвідмовної роботи – це розподіл тривалості будь-якого складного випадкового процесу, який у початковий момент часу з імовірністю  $P_i$  знаходиться на  $i$ -ій стадії у своєму розвитку може проходити через одну, дві або  $n$  стадій, тривалості яких експоненціально розподілені [19, 37, 39].

Суміш розподілів експоненціального і Вейбулла часу безвідмовної роботи дозволяє урахувати прояв випадкових відмов та явищ зношення і старіння у процесі експлуатації елементів.

*Аналіз впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності резервованих систем з дробовою кратністю*

У таблиці 3.1 представлені формули для розрахунку показників надійності п'яти різних розподілів часу до відмови елементів. У [37, 53] отримані формули та алгоритми для визначення середнього наробітку до відмови систем з



загальним навантаженим резервуванням із дробовою кратністю за різними законами розподілу часу безвідмовної роботи елементів.

Для визначення середнього наробітку до відмови систем із загальним навантаженим резервуванням із дробовою кратністю під час дифузійного немонотонного розподілу, узагальненого показового розподілів та суміші розподілів (експоненціальному та Вейбулла) часу до відмови елементів застосовується рішення трансцендентних рівнянь [39]:

$$1 - K_{\text{НАДМ.}} - \frac{1}{N} = P_M(T_{0A}), \quad (3.2)$$

де  $P_M(T_{0A})$  - імовірність безвідмовної роботи елементів:

– для експоненціального розподілу наробіток до відмови елементів:

$$\frac{T_{0A}}{T_{0M}} = -\ln\left(1 - K_{\text{НАДМ.}} - \frac{1}{N}\right) \quad (3.3)$$

– для розподілу Вейбулла наробіток до відмови елементів:

$$\frac{T_{0A}}{T_{0M}} = \frac{\left[-\ln\left(1 - K_{\text{НАДМ.}} - \frac{1}{N}\right)\right]^{1/b}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \quad (3.4)$$

Таблиця 3.1

**Формули для розрахунку показників надійності п'яти  
різних розподілів часу до відмови елементів**

Тип розподілу часу до відмови елементів	Формули для імовірності безвідмовної роботи, щільності розподілу часу до відмови і інтенсивності відмов елементів,	Примітка, $z_0 = \frac{t_0}{T_{0M}}$
1	2	3
Експоненціальний розподіл (ЕР)	$P_M(z_0) = \exp(-z_0),$ $f_M(z_0) = \lambda_M \exp(-z_0),$ $\Lambda_M = \frac{f_M(z_0)}{P_M(z_0)} = \lambda_M$	$t_0$ – час оперативної роботи $T_{0M} = \frac{1}{\lambda_M}$ – середній наробіток до відмови
Розподіл Вейбулла (ВР)	$P_M(z_0) = \exp[-(K_b z_0)^b],$ $f_M(z_0) = b K_b (K_b z_0)^{b-1} \exp[-(K_b z_0)^b],$ $\Lambda_M(z_0) = b K_b (K_b z_0)^{b-1}$	$K_b = \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$ – гамма-функція $T_{0M} = a K_b$
Дифузійний немонотонний розподіл (ДНР)	$P_M(z_0) = \Phi\left(\frac{1-z_0}{v\sqrt{z_0}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{1+z_0}{v\sqrt{z_0}}\right),$ $f_M(z_0) = \frac{1}{\mu v z_0 \sqrt{2\pi z_0}} \exp\left[-\frac{(1-z_0)^2}{2v^2 z_0}\right]$	$T_{0M} = \mu$ $v = 1$
Узагальнений показовий розподіл (УПР)	$P_M(z_0) = \left(1 - \frac{\eta}{\lambda}\right) \exp(-2z_0) + \frac{\eta}{\lambda} \exp\left(-\frac{2\eta}{\eta+\lambda} z_0\right),$ $f_M(z_0) = 2 \left[ \left(\frac{\eta}{\lambda} - 1\right) \exp(-2z_0) - \frac{\eta^2}{\lambda(\eta+\lambda)} \exp\left(-\frac{2\eta}{\eta+\lambda} z_0\right) \right]$	$T_{0M} = \frac{2}{\eta+\lambda},$ $\eta = 4\eta$

На рис. 3.1-3.4 представлені графіки залежності відносного середнього наробітку до відмови від коефіцієнта надмірності резервованої системи за

різними законами розподілу часу безвідмовної роботи елементів системи (експоненціальним розподілом (ЕР), розподілом Вейбулла (РВ), дифузійним немонотонним розподілом (ДНР), узагальненим показовим розподілом (УПР) та сумішшю розподілів експоненціального та Вейбулла (ЕР+РВ)).

За графіками на рис. 3.1 видно, що відношення  $\frac{T_{0C}}{T_{0E}}$  поступово зростає:

- від 0 до 1,0 під час збільшення  $K_{надм.}$  від 0 до 0,6 для всіх трьох резервованих систем;
- від 1,0 до 6,9 під час збільшення  $K_{надм.}$  від 0,6 до 0,998 для резервованої системи за  $N = 1024$  елементів;
- від 1,0 до 5,8 під час збільшення  $K_{надм.}$  від 0,6 до 0,993 для резервованої системи за  $N = 256$  елементів;
- від 1,0 до 4,16 під час збільшення  $K_{надм.}$  від 0,6 до 0,969 для резервованої системи за  $N = 64$  елементів.

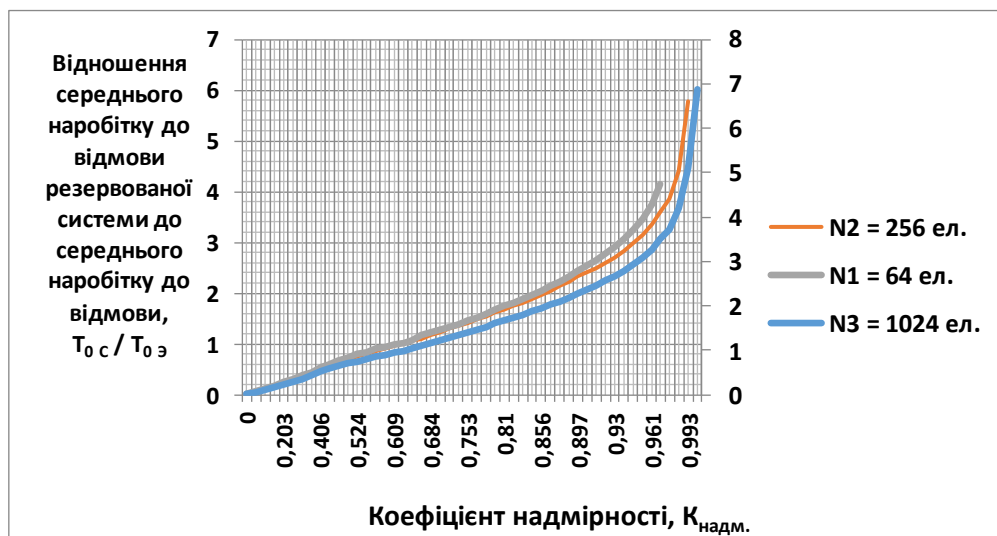


Рис. 3.1 Графіки залежності відношення середнього наробітку до відмови резервованої системи (під час загального резервування із дробовою кратністю) до середнього наробітку до відмови елементів системи  $\frac{T_{0C}}{T_{0E}}$  (для експоненціального закону розподілу часу безвідмовної роботи елементів) від коефіцієнту надмірності системи  $K_{надм.}$

Графіки відношення  $\frac{T_{0C}}{T_{0E}}$  для резервованих систем із дробовою кратністю та числом елементів у системі  $N_1 = 64, N_2 = 256, N_3 = 1024$  практично співпадають один з одним на інтервалі зміни  $K_{надм.}$  від 0 до 0,834.

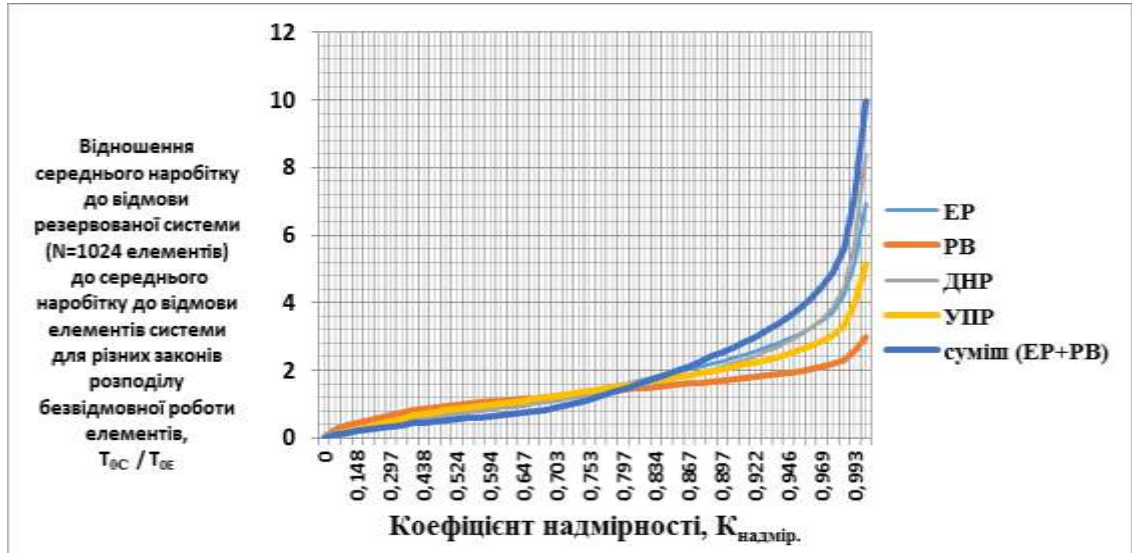


Рис. 3.2 Графіки залежності відношення середнього наробітку до відмови резервованої системи (під час загального резервування із дробовою кратністю) до середнього наробітку до відмови елементів системи для різних законів розподілу часу безвідмовної роботи елементів (ЕР, РВ, ДНР, УПР, композиції розподілів експоненціального та Вейбулла (ЕР та РВ) від коефіцієнта надмірності системи ( $K_{надм.}$  від 0 до 0,997 ).

З рис. 3.2 видно, що під час  $K_{надм.} \approx 0,80$  всі графіки нормованого наробітку до відмови резервованих систем для п'яти різних законів розподілу часу безвідмовної роботи елементів практично співпадають

$$\frac{T_{0C}}{T_{0E}} (K_{надм.} = 0,80) = 1,427 - 1,600.$$

На інтервалі зміни  $K_{надм.}$  від 0,80 до 0,997 графіки для відносного середнього наробітку до відмови резервованих систем за різними законами розподілу часу безвідмовної роботи елементів взагалі не співпадають між собою. Нижче всіх проходить графік для  $\frac{T_{0C}}{T_{0E}}$  резервованої системи, у якій розподіл часу безвідмовної роботи елементів визначається законом Вейбулла

(  $\frac{T_{0C}}{T_{0E}} (K_{надм.} = 0,997) = 2,97$  ). Вище всіх проходить графік для  $\frac{T_{0C}}{T_{0E}}$

резервованої системи, у якій розподіл часу безвідмовної роботи елементів визначається сумішшю розподілів експоненціального та Вейбулла

(  $\frac{T_{0C}}{T_{0E}} (K_{надм.} = 0,997) = 9,98$  ). Найбільшу цікавість для інженерних додатків

мають резервовані системи з загальним резервуванням із дробовою кратністю, які мають коефіцієнт надмірності  $K_{надм.}$  у діапазоні від 0 до 0,25 (див. рис. 3.3).

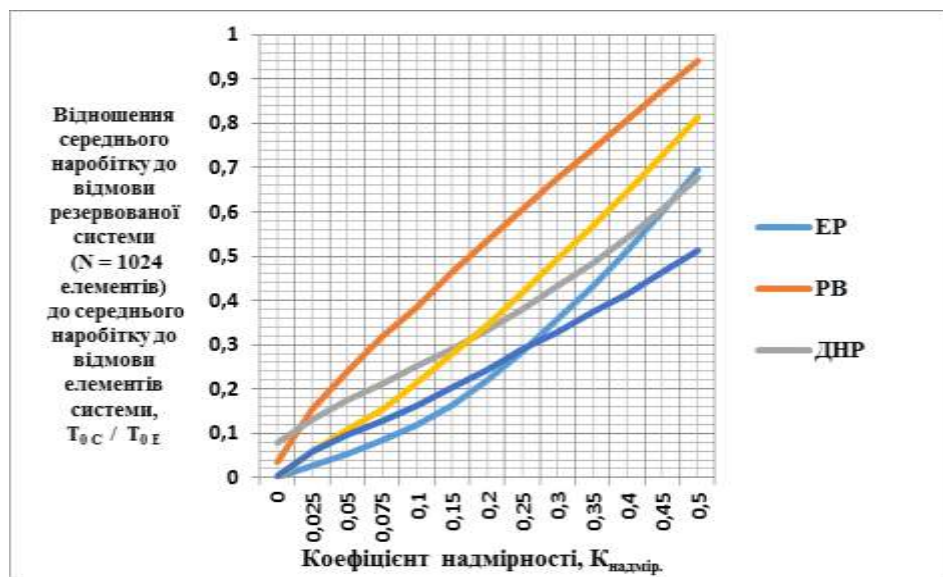


Рис. 3.3 Графіки залежності відношення середнього наробітку до відмови резервованої системи (під час загального резервування із дробовою кратністю) до середнього наробітку до відмови елементів системи (для різних законів розподілу часу безвідмовної роботи елементів) (ЕР, РВ, ДНР, УПР, суміш ЕР та РВ) від коефіцієнта надмірності системи ( $K_{надм.}$  від 0 до 0,5).

З рис. 3.3 видно, що криві для ЕР, УПР та РВ розташовані паралельно під одним кутом на вісі абсцис ( $K_{надм.}$ ). За цим, крива для ЕР розташована нижче кривої для УПР та РВ, а крива для УПР розташована нижче кривої для РВ. Криві для ДНР та суміші (ЕР та РВ) є практично паралельними та розташовані під меншим кутом до вісі абсцис ( $K_{надм.}$ ) і перетинають криві для ЕР, УПР та РВ.

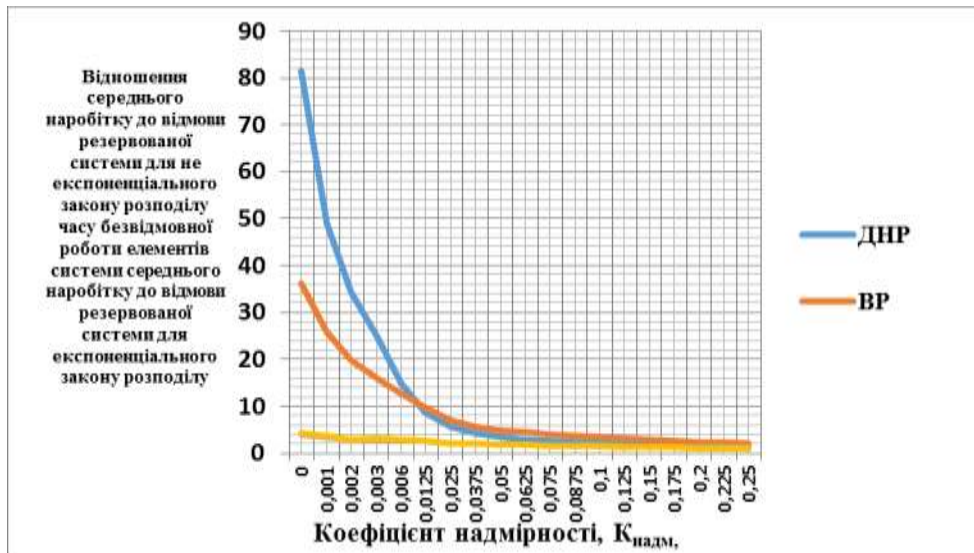


Рис. 3.4 Графіки кривих залежності відношення середнього наробітку до відмови резервованої системи (під час загального резервування з дробовою кратністю) для різних не експоненціальних законів розподілу часу безвідмовної роботи елементів системи (ВР, ДНР, УПР, суміш (ЕР+ВР) до середнього наробітку до відмови резервованої системи для експоненціального закону розподілу часу безвідмовної роботи елементів системи від коефіцієнта надмірності.

Із графіків на рис. 3.2 і 3.3 видно, що крива середнього наробітку до відмови резервованих систем із загальним резервуванням та дробовою кратністю під час не експоненціальних розподілів часу безвідмовної роботи елементів системи значно відрізняється від середнього наробітку до відмови резервованих систем із експоненціальним розподілом часу безвідмовної роботи. На рис. 3.4 показані графіки кривих відношення середнього наробітку до відмови резервованих систем до відмови резервованих систем із дробовою кратністю під час не експоненціальних розподілів часу безвідмовної роботи елементів системи до середнього наробітку до відмови резервованих систем під час експоненціальних розподілів часу безвідмовної роботи за зміною коефіцієнта надмірності від 0 до 0,25. Графіки кривих мають гіперболічний характер із максимальними значеннями за  $K_{надм} = 0$ . Найбільше значення за  $K_{надм} = 0$  має крива для резервованих систем з часом безвідмовної роботи елементів, які розподілені відповідно дифузійного немонотонного розподілу:

$$\frac{T_{0 \text{ ДНР}}}{T_{0 \text{ EP}}} (K_{\text{надм.}} = 0) = 81,6 \quad (3.5)$$

Графік кривої для резервованих систем з часом безвідмовної роботи елементів, розподілених відповідно закону Вейбула розташовується нижче (по висі ординат):

$$\frac{T_{0 \text{ PB}}}{T_{0 \text{ EP}}} (K_{\text{надм.}} = 0) = 36,1 \quad (3.6)$$

Ще нижче по висі ординат розташовуються графіки кривих для резервованих систем з часом безвідмовної роботи елементів, розподілених відповідно закону для узагальненого показового розподілу:

$$\frac{T_{0 \text{ УПР}}}{T_{0 \text{ EP}}} (K_{\text{надм.}} = 0) = 3,79 \quad (3.7)$$

та відповідно закону для суміші (EP та PB):

$$\frac{T_{0 \text{ (EP+PB)}}}{T_{0 \text{ EP}}} (K_{\text{надм.}} = 0) = 4,20 \quad (3.8)$$

### 3.3 Побудова структурних схем надійності приймально-передавальних АФАР

В даний час кількість випромінюючих (передавальних) каналів в приймально-передавальній АФАР може коливатися від однієї тисячі до кількох десятків тисяч. Для забезпечення керованості НВЧ сигналів у процесі експлуатації АФАР конструктивно фрагментують на ряд підрешіток –  $S_0$ , кожна з яких характеризується своїм значенням амплітуди і фази НВЧ сигналу для всіх приймально-передавальних каналів даної підрешітки. При цьому кожна підрешітка містить  $G_0$  – приймально-передавальних каналів. Відповідно, загальна кількість приймально-передавальних каналів АФАР дорівнює  $N_0 = G_0 S_0$ . Тому для типової АФАР характерною буде дворівнева структурна схема надійності, представлена на рис. 3.5 і рис. 3.6 [35, 36].

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

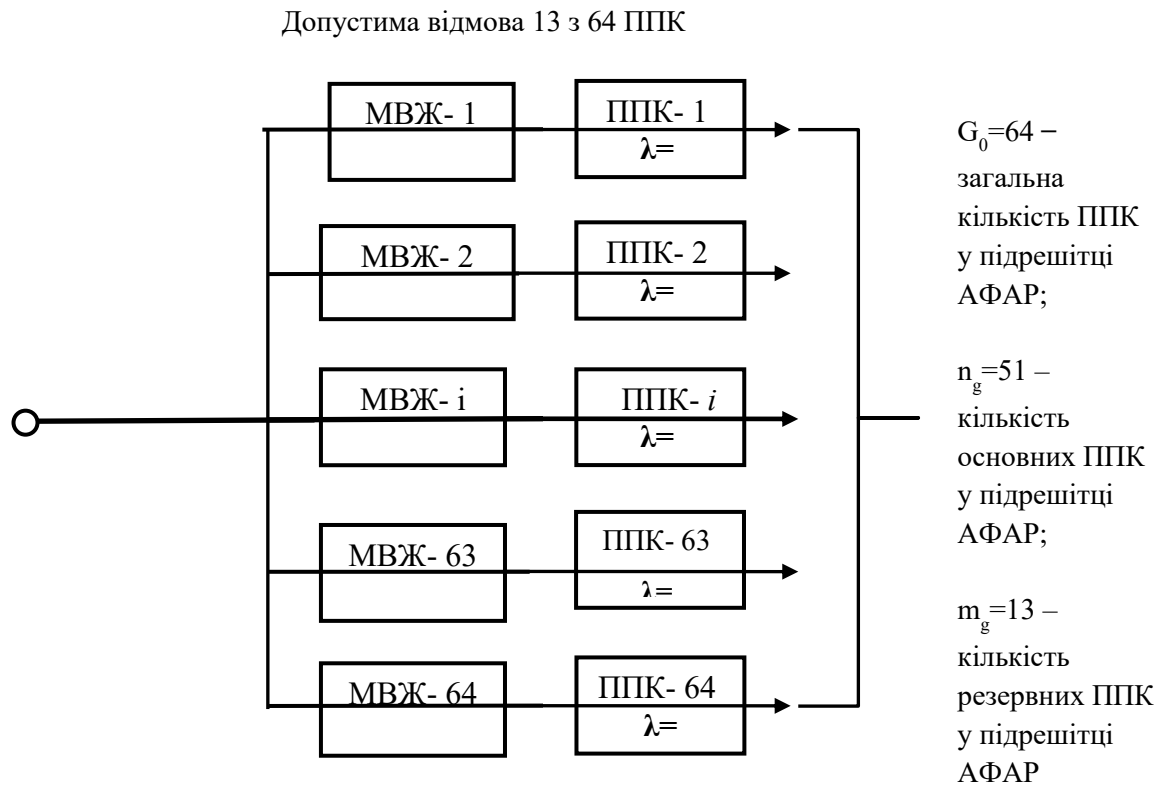


Рис.3.5 Структурна схема надійності активної фазованої антенної підрешітки (перший рівень структурної схеми надійності АФАР)

В АФАР на передавання у ППК працюють передавальні канали, а на приймання – приймальні канали. Конструктивно декілька ППК можуть бути зібрані в один приймально-передавальний модуль (ППМ).



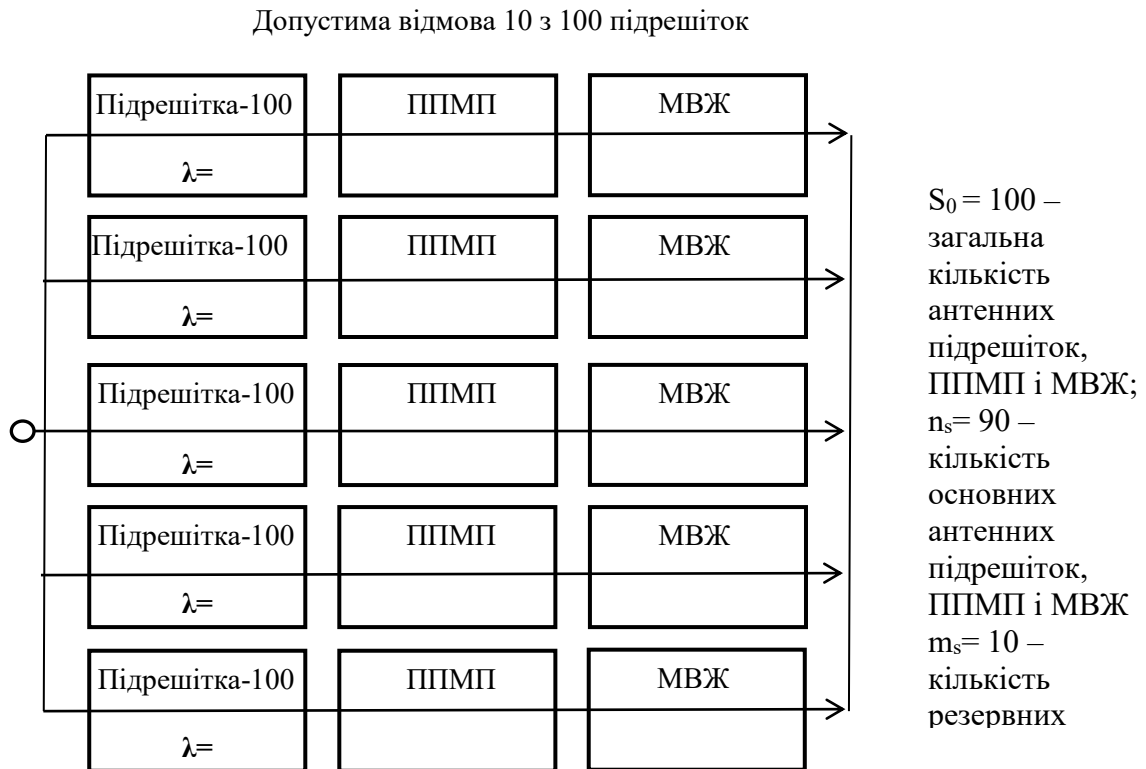


Рис.3.6 Структурна схема надійності приймально-передавальної АФАР РС (другий рівень структурної схеми надійності АФАР)

### 3.4 Розроблення моделі надійності активної фазованої антенної підрешітки

ССН антенної підрешітки описується моделлю АФАР з однорівневою ССН (на рис. 3.5).

Кількість працездатних ППК в антенній підрешітці визначається за формулою [36]:

$$G(t) = P_{\text{МВЖ}}(t)P_{\text{ППК}}(t)G_0 \quad (3.9)$$

Критерієм (умовою) умовної відмови підрешітки, яка має  $G_0$  працездатних ППК, є відмова  $m_G + 1$  ППК у момент часу:

$t_{\text{відм.}} = T_{0\_ПДР}$ . Зниження кількості працездатних ППК у підрешітці описується в момент  $t_{\text{відм.}} = T_{0\_ПОДР}$  виразом:

$$G(t_{\text{відм.}} = T_{0\_A\_ПІДР.}) = G_0 - m_G - 1, \quad (3.10)$$

де:  $m_G$  – допустима кількість відмов у антенній підрешітці.

Використовуючи формулу (3.9) та рівність (3.10) можна записати

$$P_{\text{МВЖ}}(t_{\text{відм.}} = T_{0\_A\_ПІДР.})P_{\text{ППК}}(t_{\text{відм.}} = T_{0\_A\_ПІДР.})G_0 = G_0 - m_G - 1 \quad (3.11)$$

Розділивши ліву та праву частини рівності (3.11) на  $G_0$  отримуємо наступне рівняння:

$$P_{\text{МВЖ}}(t_{\text{відм.}} = T_{0\_A\_ПІДР.})P_{\text{ППК}}(t_{\text{відм.}} = T_{0\_A\_ПІДР.}) = 1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0} \quad (3.12)$$

Для випадку експоненціального розподілу відмов виразу (3.12) після перетворення спрощується та буде мати такий вигляд:

$$\exp[-(\lambda_{\text{ППК}} + \lambda_{\text{МВЖ}})T_{0\_A\_ПІДР.}] = 1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0} \quad (3.13)$$

Логарифмування правої і лівої частин рівності (3.13) дозволяє отримати остаточні формули для визначення показників надійності антенної підрешітки:

- середнього наробітку до відмови

$$\lambda_{\text{ПІДР.}} = -\frac{\lambda_{\text{ППК}} + \lambda_{\text{МВЖ}}}{\ln\left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0}\right)} \quad (3.14)$$

- інтенсивності відмов

$$\lambda_{\text{ПІДР.}} = -\frac{\lambda_{\text{ППК}} + \lambda_{\text{МВЖ}}}{\ln\left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0}\right)} \quad (3.15)$$

На рис. 3.7 представлений графік залежності відносного наробітку до відмови антенної підрешітки -  $\frac{T_{0\_A\_ФАР}}{T_{0\_ППК}}$  від відносної допустимої кількості відмов підрешітки -  $\frac{m_g}{G_0}$ . З рис. 3.7 видно, що  $T_{0\_A\_ФАР}$  лінійно зростає зі збільшенням допустимої кількості відмов антенної підрешітки, що повністю відповідає формулам (3.14) і (3.15).

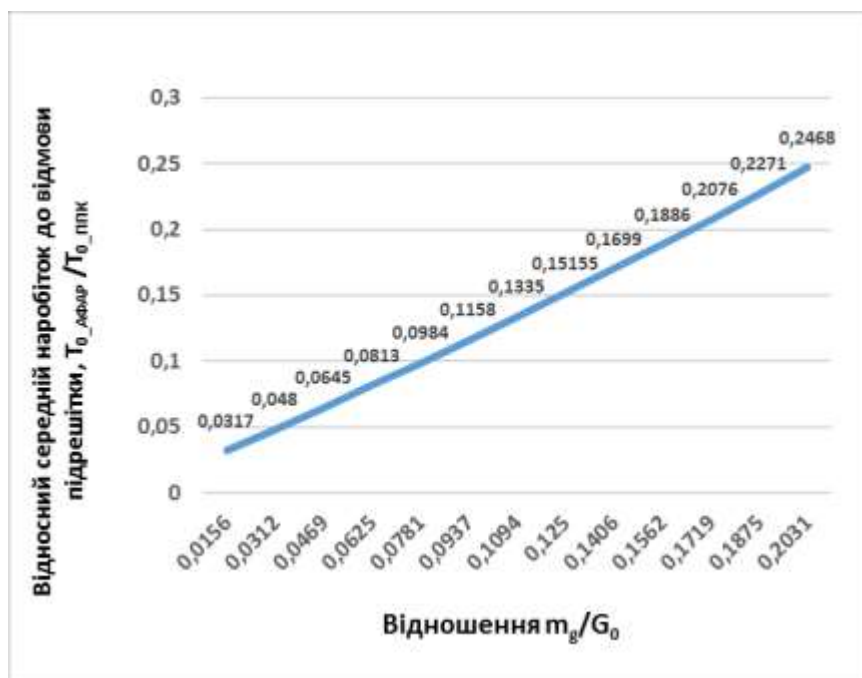


Рис. 3.7 Графік залежності відносного середнього наробітку до відмови антенної підрешітки від відношення допустимого числа відмов ППК у підрешітці –  $m_g$  до загальної кількості ППК –  $G_0$  (для  $G_0 = 64$  ППК і  $\lambda_{\text{МВЖ}} = 0$ )

Для визначення імовірності безвідмовної роботи антенної підрешітки використовується математична модель розрахунку надійності резервованої невідновлювальної структури зі змінним резервом (що складається з  $n$  - робітників і  $m$  - резервних ідентичних елементів) [82]:

$$P_{\text{ПДР.}}(t) = \sum_{i=0}^{m_g} C_{G_0}^i [P_{\text{ППК}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)]^{G_0-i} [1 - P_{\text{ППК}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)]^i, \quad (3.16)$$

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 підрешітці

Щільність розподілу імовірності безвідмовної роботи антенної підрешітки визначається за формулою:

$$f_{\text{підр.}}(t) = (G_0 - m_G) C_{G_0}^{m_G} [1 - P_{\text{ППК}}(t) P_{\text{МВЖ}}(t)]^{m_G} [P_{\text{ППК}}(t) P_{\text{МВЖ}}(t)]^{G_0 - m_G - 1} f(t) \quad (3.17)$$

Інтенсивність відмов антенної підрешітки визначається за формулою:

$$\Lambda_{\text{підр.}}(t) = \frac{f_{\text{підр.}}(t)}{P_{\text{підр.}}(t)} \quad (3.18)$$

Гамма-відсотковий ресурс антенної підрешітки -  $T_{\gamma_{\text{підр.}}}$  визначається вирішенням рівняння:

$$P_{\text{підр.}}(t = T_{\gamma_{\text{підр.}}}) = \gamma_{\text{підр.}} \quad (3.19)$$

На рис. 3.8 показані графіки імовірності безвідмовної роботи антенної підрешітки в залежності від відносного наробітку АФАР -  $\frac{t}{T_{0\_АФАР}}$  для будь-яких значень допустимих відмов ППК у антенній підрешітці

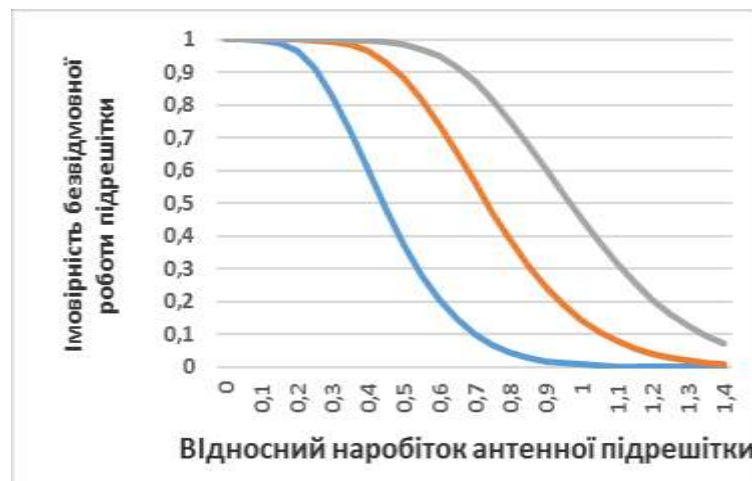


Рис. 3.8 Графіки залежності імовірності безвідмовної роботи від відносного наробітку до відмови антенної підрешітки для різної кількості відмов ППК у підрешітці:  $m_g = 6$  - синя лінія;  $m_g = 10$  - червона лінія;  $m_g = 13$  - зелена лінія.

*Оцінка адекватності (достовірності) нової математичної моделі оцінки надійності АФАР з однорівневою ССН*

Оцінка адекватності (достовірності) математичної моделі оцінки надійності АФАР з однорівневою ССН виконано здобувачем разом з науковим керівником Костановським В.В. [36, 41]. Використання формули (3.14), отриманої для моделі оцінки надійності АФАР, призводить до значно меншої

похибки ніж використання класичної моделі надійності резервованої невідновлювальної структури з навантаженим ковзаючим резервом (1,2 % при 10 елементах і 0,100 % при 480 елементах у структурі АФАР) яка швидко зменшується до нуля зі збільшенням кількості більш 1000 елементів.

### 3.5 Розроблення моделі надійності АФАР з дворівневою 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 дворівневою ССН (рис. 3.6).

Кількість ППК, що відмовили у дворівневій АФАР визначається за формулою [36]:

$$\Delta N = N_0 \{1 - P_{\text{ППК}}(t)P_{\text{ППМП}}(t)[P_{\text{МВЖ}}(t)]^2\} \quad (3.20)$$

Використовуючи формулу (3.20) можна вивести рівняння для визначення середнього наробітку до відмови АФАР -  $T_{0\_АФАР\_1}$ :

$$(\Delta N)_{\text{доп.}} + 1 = N_0 \{1 - P_{\text{ППК}}(T_{0\_АФАР\_1})P_{\text{ППМП}}(T_{0\_АФАР\_1})[P_{\text{МВЖ}}(T_{0\_АФАР\_1})]^2\} \quad (3.21)$$

Для експоненціального розподілу відмов каналів та АФАР рівняння (3.21) трансформується у формулу для визначення нормованого наробітку до відмови передавальної АФАР:

$$\frac{T_{0\_АФАР\_1}}{T_{0\_ППК}} = - \frac{\ln(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0 S_0})}{1 + \frac{T_{0\_ППК}}{T_{0\_ППМП}} + \frac{2T_{0\_ППК}}{T_{0\_МВЖ}}} \quad (3.22)$$

Для визначення безвідмовної роботи АФАР з дворівневою ССН використовується класична формула для резервованої невідновлювальної структури зі змінним резервом [82]:

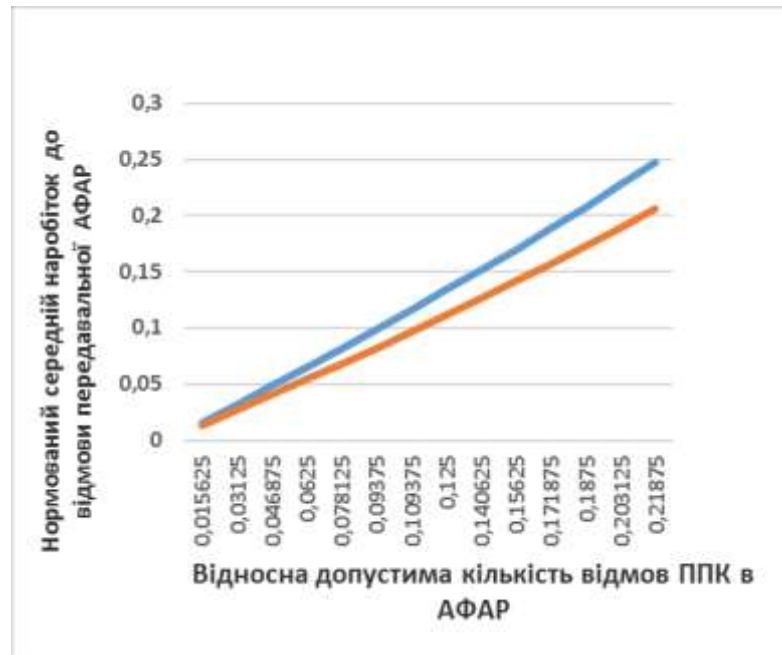


Рис. 3.9 Графіки залежності відносного середнього наробітку до відмови АФАР від відносної допустимої кількості відмов в АФАР:

$$a) \frac{T_{0\_АФАР\_1}}{T_{0\_ППК}} \text{ за } \frac{T_{0\_ППК}}{T_{0\_ППМП}} = 0,01; \frac{2T_{0\_ППК}}{T_{0\_МВЖ}} = 0,01 \text{ – синя лінія;}$$

$$b) \frac{T_{0\_АФАР\_2}}{T_{0\_ППК}} \text{ за } \frac{T_{0\_ППК}}{T_{0\_ППМП}} = 0,1; \frac{2T_{0\_ППК}}{T_{0\_МВЖ}} = 0,10 \text{ – червона лінія}$$

З рис. 3.7 видно, що середній наробіток до відмови АФАР залежить лінійно від допустимої кількості відмов ППК у АФАР.

Формула для ІБР має вигляд:

$$P_{АФАР}(t) = \sum_{j=0}^{m_s} C_{S_0}^j [P_{ПІДР}(t)P_{МВЖ}(t)P_{ППМП}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{ПІДР}(t)P_{МВЖ}(t)P_{ППМП}(t)]^j, \quad (3.23)$$

де:

$P_{ПІДР}(t)$  – імовірність безвідмовної роботи антенної підрешітки, яка визначається за формулою (3.16);

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

$m_s$  – допустима кількість умовних відмов підрешіток в АФАР;

$S_0$  – загальна кількість підрешіток в АФАР

Щільність розподілу імовірності безвідмовної роботи АФАР визначається за формулою:

$$f_{\text{АФАР}}(t) = -\frac{dP_{\text{АФАР}}(t)}{dt} \text{ або} \quad (3.24)$$

$$f_{\text{АФАР}}(t) = (s_0 - m_s) C_{s_0}^{m_s} [1 - P_{\text{ПДР}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)P_{\text{ППМП}}(t)]^{m_s} [P_{\text{ПДР}}(t)P_{\text{МВЖ}}(t)P_{\text{ППМП}}(t)]^{s_0 - m_s - 1} \quad (3.25)$$

Інтенсивність відмов АФАР визначається за формулою:

$$\Lambda_{\text{АФАР}}(t) = \frac{f_{\text{АФАР}}(t)}{P_{\text{АФАР}}(t)} \quad (3.26)$$

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

$$P_{\text{АФАР}}(t = T_{\gamma_{\text{АФАР}}}) - \gamma_{\text{АФАР}} = 1 \quad (3.27)$$

Для визначення допустимого числа умовних відмов підрешіток в АФАР необхідно скласти і вирішити рівняння щодо  $m_s$  для середнього наробітку до відмови  $T_{0_{\text{АФАР}_2}} \geq T_{0_{\text{АФАР}_1}}$ :

$$P_{\text{МВЖ}}(t = T_{0_{\text{АФАР}_2}})P_{\text{ППМП}}(t = T_{0_{\text{АФАР}_2}})P_{\text{ПДР}}(t = T_{0_{\text{АФАР}_2}}) = 1 - \frac{m_s}{s_0} - \frac{1}{s_0} \quad (3.28)$$

*Примітка.* Умовно відмовившою вважається підрешітка у якій відмовило  $m_g + 1$  випромінювачів. У цій підрешітці є непрацездатні тільки  $m_g + 1$  ППК, інші ППК є працездатними і забезпечують функціонування АФАР.

Імовірність безвідмовної роботи антенної підрешітки у рівнянні (3.27) визначається за допустимим числом відмов ППК -  $m_g = \frac{\Delta N}{N_0} G_0$

Отже, обчисливши раніше  $T_{0_{\text{АФАР}_1}}$  з рішення рівняння (3.22), і підставивши його значення в рівняння (3.27) визначається допустима кількість умовних відмов підрешіток -  $m_s$  з допустимим числом відмов ППК -  $m_g$  у кожній підрешітці. На підставі певних значень  $m_g$  і  $m_s$  надалі визначаються імовірні показники надійності АФАР.

Для випадку експоненціального розподілу відмов рівняння (3.27) після перетворення набуває такого вигляду:

$$\exp [-(\lambda_{\text{ППМП}} + \lambda_{\text{ПДР}} + 2\lambda_{\text{МВП}})T_{0\_АФАР}] = 1 - m_S/S_0 - 1/S_0 \quad (3.29)$$

Логарифмування лівої і правої частин рівняння (3.29) дозволяє вивести формули для визначення показників надійності АФАР з дворівневою ССН:

- середній наробітки до відмови АФАР

$$T_{0\_АФАР\_2} = - \frac{\ln[1 - m_S/S_0 - 1/S_0]}{(\lambda_{\text{ППМП}} + \lambda_{\text{ПДР}} + 2\lambda_{\text{МВП}})} \quad (3.30)$$

і відносним середнім наробітком до відмови АФАР

$$\frac{T_{0\_АФАР\_2}}{T_{0\_ПДР}} = - \frac{\ln[1 - \frac{m_S}{S_0} - \frac{1}{S_0}]}{1 + \frac{2T_{0\_ПДР}}{T_{0\_МВП}} + \frac{T_{0\_ПДР}}{T_{0\_ППМП}}} \quad (3.31)$$

Розподіл відмовили ППК в АФАР для моменту часу, відповідного середньому наробітку до відмови АФАР -  $T_{0\_АФАР\_2}$  можна представити таким виразом:

$$(\Delta N)_{\text{доп.}} = (m_g + 1)(m_S + 1) + m_g W_0 + (m_g - 1)W_1 + \dots + (m_g - k)W_k \quad (3.32)$$

Причому у формулі значення кількості умовно відмовивших антенних підрешіток  $W_i, i = 1, k$  можуть розподілятися випадковим чином, однак сума членів  $(m_S + 1), W_0, W_1, \dots, W_k$  обов'язково повинна дорівнювати загальній кількості підрешіток в АФАР -  $S_0$ .

### **3.6 Розроблення та дослідження математичних моделей надійності каналів, модулів, антенної підрешітки та АФАР під час раптових і поступових відмов приймально-передавальних каналів**

#### **3.6.1 Розроблення та дослідження математичних моделей надійності каналів і модулів АФАР**

До складу ППК, АППМ, ППМП і МВЖ АФАР входять активні і пасивні ЕРВ. Інтенсивність відмов пасивних ЕРВ (конденсаторів, резисторів, атенюаторів тощо) в десятки і сотні разів нижче інтенсивності відмов активних ЕРВ, тому під час розрахунку надійності ППК, АППМ, ППМП і



МВЖ надійністю пасивних ЕРВ можна знехтувати. До складу ППК входять НВЧ транзистори вихідних підсилювачів передавальних каналів і малошумних підсилювачів приймальних каналів, а також НВЧ мікромодулі і мікросхеми. Структурна схема надійності типового ППК, АППМ, ППМП і МВЖ є послідовною, яка включає до свого складу  $N$  типи активних елементів, кожна  $j$  - а група складається з  $n_j$  активних елементів.

Таблиця 3.2

### Параметри математичної моделі надійності ППК

Назва показника	Назва математичної моделі надійності ППК	Номер формули
1	2	3
Модель надійності ППК, яка враховує тільки раптові відмови		
	Експоненціальний розподіл (ER)	
Імовірність безвідмовної роботи	$P_{\text{ППМ}_E}(t) = \exp(-\Lambda_{\text{ППМ}_E}t)$	3.33
Щільність розподілу імовірності	$f_{\text{ППМ}_E}(t) = \Lambda_{\text{ППК}_E} \exp(-\Lambda_{\text{ППМ}_E}t)$	3.34
Інтенсивність відмов	$\Lambda_{\text{ППМ}_E} = \sum_{j=1}^N n_j \lambda_j$	3.35
Середній наробіток до відмови	$T_{0\_ППМ}_E = \frac{1}{\Lambda_{\text{ППМ}_E}}$	3.36
Гамма-відсотковий наробіток	$t_\gamma = -\frac{\ln(1-\gamma)}{\Lambda_{\text{ППМ}_E}}$	3.37
Моделі надійності ППК, які враховують тільки поступові відмови		
	Розподіл Вейбулла (VR)	
Імовірність безвідмовної роботи	$P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right]$	3.39
Щільність розподілу імовірності	$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right]$	3.40
Інтенсивність відмов	$\Lambda(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}$	3.41

1	2	3
Середній наробіток до відмови	$M(t) = T_0 = a\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$	3.42
Гамма-відсотковий наробіток	$t_\gamma = a \left[ \ln \frac{1}{\gamma} \right]^{1/b}$	3.43
<b>Дифузійний немонотонний розподіл (DNR)</b>		
Імовірність безвідмовної роботи	$P_{\text{ППМ}_{DN}}(t) = \Phi\left(\frac{T_{0\text{ППМ}_{DN}} - t}{v_{\text{ППМ}} \sqrt{T_{0\text{ППМ}_{DN}} t}}\right) \cdot \exp\left(\frac{2}{v_{\text{ППМ}}}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0\text{ППМ}_{DN}} + t}{v_{\text{ППМ}} \sqrt{T_{0\text{ППМ}_{DN}} t}}\right)$	3.44
Щільність розподілу імовірності	$f_{\text{ППМ}_{DN}}(t) = \frac{\sqrt{T_{0\text{ППМ}_{DN}}}}{v_{\text{ППМ}} t \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t - T_{0\text{ППМ}_{DN}})^2}{2v_{\text{ППМ}}^2 t * T_{0\text{ППМ}_{DN}}}\right]$	3.45
Інтенсивність відмов	$\Lambda_{\text{ППМ}_{DN}} = \frac{f_{\text{ППМ}_{DN}}(t)}{P_{\text{ППМ}_{DN}}(t)}$	3.46
Середній наробіток до відмови	$T_{0\text{ППМ}} = \left(\sum_{j=1}^n n_j T_{0j}^{-2}\right)^{-1/2}$	3.47
Коефіцієнт варіації	$v_{\text{ППМ}} = \left(\sum_{j=1}^N n_j V_{\text{э}j}^2 T_{0j}^j\right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\sum_{j=1}^N n_j T_{0j}^{-2}\right)^{-\frac{1}{2}},$ де: $T_{0j}$ , $V_{\text{э}j}$ - відповідно, середній наробіток до відмови і коефіцієнт варіації $j$ -го ЕРВ ППМ	3.48
Гамма-відсотковий наробіток $t_\gamma$	Визначається за рівнянням: $\Phi\left(\frac{T_{0\text{ППМ}_{DN}} - t_\gamma}{v_{\text{ППМ}} \sqrt{T_{0\text{ППМ}_{DN}} t_\gamma}}\right) \cdot \exp\left(\frac{2}{v_{\text{ППМ}}}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0\text{ППМ}_{DN}} + t_\gamma}{v_{\text{ППМ}} \sqrt{T_{0\text{ППМ}_{DN}} t_\gamma}}\right) = 1 - \gamma$	3.49
<b>Модель надійності ППМ, яка враховує спільний прояв раптових і поступових відмов</b>		
<b>Композиція експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів (ER/2×NR/2)</b>		
Інтенсивність відмови ЕРВ	$\lambda_{\text{ПОВН.}_\text{ВІДМ.}} = \lambda_{\text{РАПТ.}_\text{ВІДМ.}} + \lambda_{\text{ПОСТ.}_\text{ВІДМ.}}; \lambda_{\text{РАПТ.}_\text{ВІДМ.}} = \alpha_1 \lambda_{\text{ПОВН.}_\text{ВІДМ.}};$ $\lambda_{\text{ПОСТ.}_\text{ВІДМ.}} = \alpha_2 \lambda_{\text{ПОВН.}_\text{ВІДМ.}}; \alpha_1 + \alpha_2 = 1$	3.50
Імовірність безвідмовної роботи	$P_{\text{ППМ}_{E*DN}}(t) = \exp(-t \sum_{j=1}^N n_j \lambda_{j\text{вн.отк.}}) \times \left[ \Phi\left(\frac{T_{0\text{ППМ}_{DN}} - t}{v_{\text{ППМ}} \sqrt{T_{0\text{ППМ}_{DN}} t}}\right) \cdot \exp\left(\frac{2}{v_{\text{ППМ}_{DN}}}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0\text{ППМ}_{DN}} + t}{v_{\text{ППМ}} \sqrt{T_{0\text{ППМ}_{DN}} t}}\right) \right]$	3.51

1	2	3
Середній наробіток до постійної відмови ППМ	$T_{0\_ППМ\_DN} = \left( \sum_{j=1}^n n_j T_{0\_ПОСТ\_ВІДМ\_j}^{-2} \right)^{-1/2}.$	3.52
Коефіцієнт варіації ППМ для DN – розподіл поступових відмов	$v_{ППМ\_DN} = \left( \sum_{j=1}^N n_j V_{\lambda_j}^2 T_{0\_ПОСТ\_ВІДМ\_j}^j \right)^{1/2} \times \left( \sum_{j=1}^N n_j T_{0\_ПОСТ\_ВІДМ\_j}^{-2} \right)^{-1/2}.$	3.53
Гамма-відсотковий наробіток $t_\gamma$	Визначається за рівнянням: $\exp(-t_\gamma \sum_{j=1}^N n_j \lambda_{j\_ВН\_ВІДМ.}) \times \left[ \Phi \left( \frac{T_{0\_ППМ\_DN} - t_\gamma}{v_{ППМ} \sqrt{T_{0\_ППМ\_DN} t_\gamma}} \right) - \exp\left(\frac{2}{v_{ППМ\_DN}}\right) \Phi \left( -\frac{T_{0\_ППМ\_DN} + t_\gamma}{v_{ППМ} \sqrt{T_{0\_ППМ\_DN} t_\gamma}} \right) \right] = 1 - \gamma$	3.54

Під час розробки математичних моделей надійності АППМ, ППМП і МВЖ використовуються математичні моделі надійності ЕРВ, які побудовані на основі наступних розподілів (табл. 3.2) [43]:

- експоненціального розподілу – для опису прояви раптових відмов каналів і модулів;
- дифузійного немонотонного розподілу і розподілу Вейбулла (імпульсні пристрої) – для опису прояви поступових відмов;
- композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів;
- композиції розподілу Вейбулла і дифузійного немонотонного розподілу – для опису спільного прояву раптових і поступових відмов.

На рис. 3.10 – 3.12 представлені графіки залежностей імовірності безвідмовної роботи, щільності розподілу відмов і інтенсивності відмов АФАР від нормованого наробітку ППК для різних законів розподілу відмов ППК.

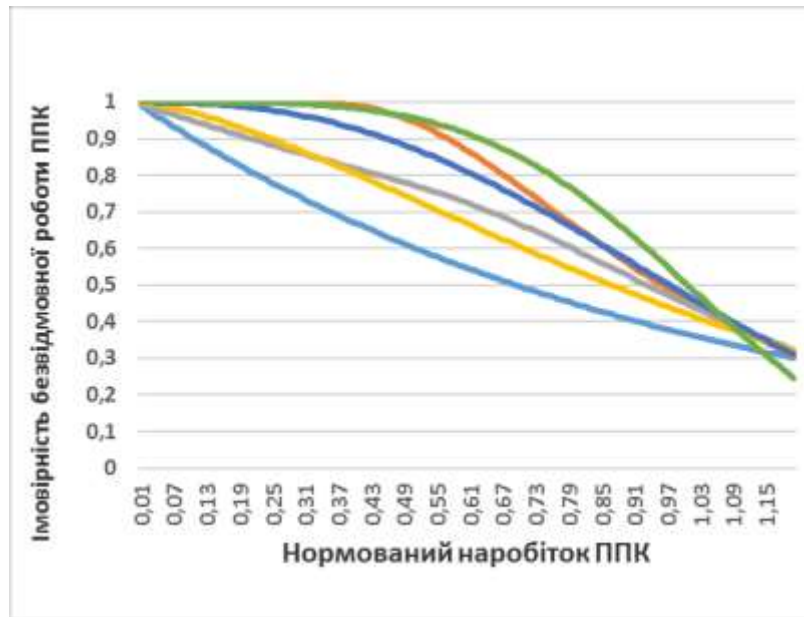


Рис. 3.10 Графіки залежності імовірності безвідмовної роботи ППК від нормованого наробітку до відмови для різних законів розподілу відмов: ER- графік блакитного кольору; DNR - графік коричневого кольору; ER/2 × DNR/2 - графік фіолетового кольору; WR0 - графік жовтого кольору; WR1 - графік синього кольору; WR2 - графік зеленого кольору

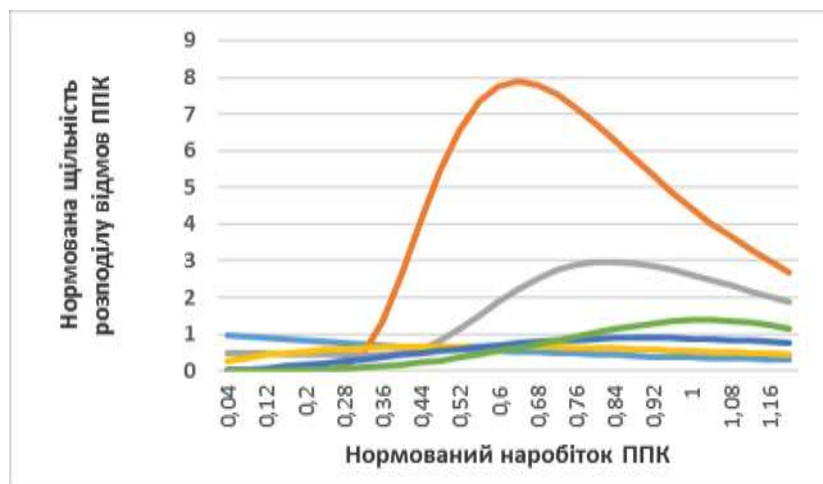


Рис. 3.11 Графіки щільності розподілу відмов ППК від нормованого наробітку до відмови для різних законів розподілу відмов: ER - графік блакитного кольору; DNR - графік коричневого кольору; ER/2 × DNR/2 - графік фіолетового кольору; WR0 - графік жовтого кольору; WR1 - графік синього кольору; WR2 - графік зеленого кольору.

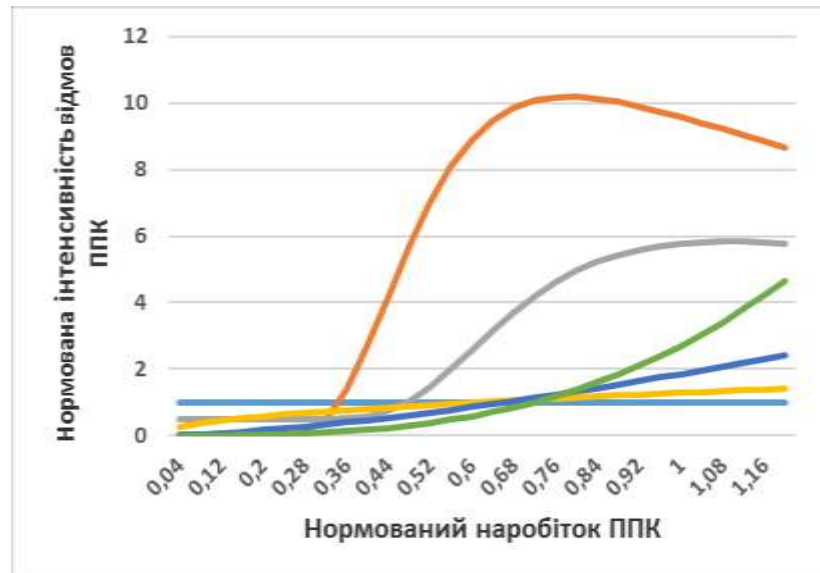


Рис. 3.12 Графіки залежності інтенсивності відмов ППК від нормованого наробітку до відмови для різних законів розподілу відмов: ER - графік блакитного кольору; DNR - графік коричневого кольору; ER/2 x DNR/2 - графік фіолетового кольору; WR0 - графік жовтого кольору; WR1 - графік синього кольору; WR2 - графік зеленого кольору

Представлені у підрозділі 3.6.1 моделі надійності ППК служать вихідною інформацією для дослідження у розділі 3 математичних моделей надійності АФАР РЛС.

### 3.6.2 Розроблення та дослідження математичної моделі надійності антенної підрешітки під час раптових і поступових відмов ППК

Метою дослідження моделі надійності антенної підрешітки є розроблення узагальненої номограми для визначення середнього наробітку до відмови антенної підрешітки і графіків ІБР, щільності розподілу імовірності відмов, інтенсивності відмов за різними законами розподілу відмов ППК [44]:

- експоненціальному розподілі (прояв раптових відмов);
- дифузійному немонотонному розподілі, розподілі Вейбулла (прояв поступових відмов);

- композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів (спільний прояв раптових і поступових відмов).

Антенна підрешітка, що досліджується, включає до свого складу 64 ППК.

Математична модель надійності антенної підрешітки, що досліджується відповідає моделі надійності АФАР з однорівневою ССН, яка представлена у підрозділі 3.5.2.

Середній наробіток до відмови антеної фазованої підрешітки визначається з рішення трансцендентного рівняння:

$$P_{\text{ППК}}(T_{0_{\text{ПДР}}})P_{\text{МВЖ}}(T_{0_{\text{ПДР}}}) = 1 - \frac{m_g}{G_0} - \frac{1}{G_0} \quad (3.55)$$

З огляду на необхідність виконання вимог щодо надійності до джерел вторинного живлення АФАР:

$$T_{0_{\text{ППК}}} \leq (0,05 - 0,10)T_{0_{\text{МВЖ}}} \quad (3.56)$$

Трансцендентне рівняння (3.55) спрощується:

$$P_{\text{ППК}}(T_{0_{\text{ПДР}}}) \approx 1 - \frac{m_g}{G_0} - \frac{1}{G_0} \quad (3.57)$$

Якщо відмови ППК описуються розподілом Вейбулла, то відносний середній наробіток до відмови антенної підрешітки описується простою формулою:

$$\frac{T_{0_{\text{ПДР}}}}{T_{0_{\text{ППК}}}} = a \left[ -\ln\left(1 - \frac{m_g}{G_0} - \frac{1}{G_0}\right) \right]^{1/b}, \quad (3.58)$$

Для експоненціального розподілу відмов ППК, що є окремим випадком розподілу Вейбулла, формула (3.58) ще більш спрощується і має вигляд:

$$\frac{T_{0_{\text{ПДР}}}}{T_{0_{\text{ППК}}}} = \left[ -\ln\left(1 - \frac{m_g}{G_0} - \frac{1}{G_0}\right) \right] \quad (3.59)$$

### Приклад 3.2

Визначити відносний середній наробіток до відмови антенної підрешітки за різними значеннями надмірності  $\frac{m_G}{G_0}$  для різних законів

розподілів відмов ППК за наступними вихідними даними:  $G_0 = 64$  ППК,

$\lambda_{ER\_ППК} = 0,00001 \text{ год}^{-1}$ ,  $T_{0\_ER\_ППК} = 100000 \text{ год}$  - експоненціальний розподіл;

$\lambda_{DNR\_ППК}(t = T_{HM}) = 0,00001 \text{ год}^{-1}$ ,  $T_{0\_DNR\_ППК} = 136111 \text{ год}$  - дифузійний немонотонний розподіл;

$\lambda_{ER \ast DNR\_ППК}(t = T_{HM}) = 0,00001 \text{ год}^{-1}$ ;  $T_{0\_ER \ast DNR\_ППК} = 258804 \text{ год}$  композиція експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів;

$T_{0\_WR0\_ППК} = 100000 \text{ год}$ ,  $a = 1,1078$ ,  $b = 1,5$  - розподіл Вейбулла (WR0);

$T_{0\_WR1\_ППК} = 100000 \text{ год}$ ,  $a = 1,12714$ ,  $b = 2,5$  - розподіл Вейбулла (WR1);

$T_{0\_WR2\_ППК} = 100000 \text{ год}$ ,  $a = 1,1033$ ,  $b = 4,0$  - розподіл Вейбулла (WR2).

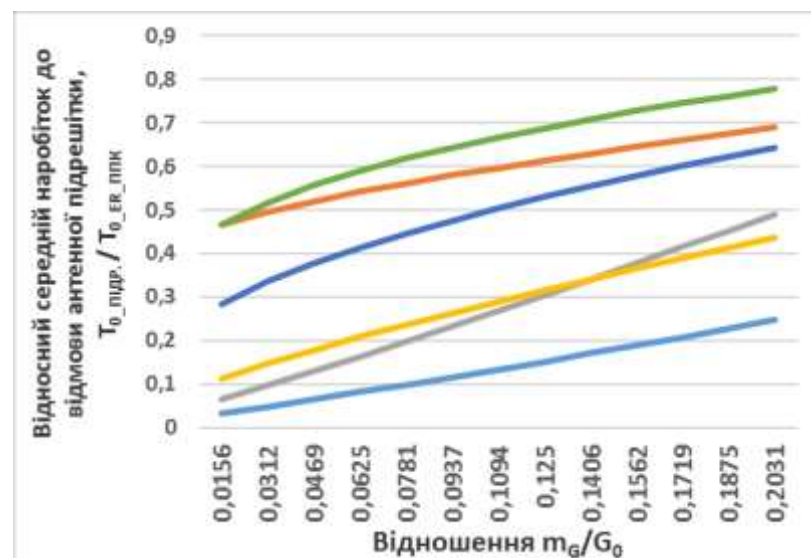


Рис. 3.13 Номограма залежності відносного середнього наробітку до відмови антенної підрешітки –  $T_{0\_пдр}/T_{0\_ппк}$  (на 64 ППК) від рівня надмірності ППК для різних законів розподілу відмов ППК: ER - лінія блакитного кольору; розподілу

Вейбулла: WR0 - лінія жовтого кольору; WR1 - лінія синього кольору; WR2 - лінія фіолетового кольору; DNR - лінія коричневого кольору; композиції ER/2\*DNR/2 розподілів - лінія фіолетового кольору

На рис. 3.13 представлені графіки залежності відносного середнього наробітку до відмови антенної підрешітки -  $\frac{T_{0\_ПДР}}{T_{0\_ER\_ППК}}$  від надмірності  $\frac{m_G}{G_0}$  для різних законів розподілу відмов.

Для визначення імовірності безвідмовної роботи, щільності розподілу відмов і інтенсивності відмов антенної підрешітки використовуються формули (3.15) - (3.19).

### **3.6.3 Розроблення та дослідження математичних моделей надійності передавальної активної фазованої антенної решітки під час раптових і поступових відмов приймально-передавальних каналів**

Досліджуються показники надійності перспективної передавальної АФАР з наступними структурними параметрами:

$N_0 = 6400$  - кількість випромінюючих (передавальних) каналів в АФАР;

$S_0 = 100$  - кількість передавальних антенних фазованих підрешіток;

$G_0 = 64$  - кількість випромінюючих (передавальних) каналів в антенній підрешітці.

Середній наробіток до відмови передавальної АФАР під час довільного розподілу відмов каналів і модулів визначається за допомогою трансцендентного рівняння (3.21):

$$(\Delta N)_{\text{доп.}} + 1 = N_0 \{1 - P_{\text{ППК}}(T_{0\_АФАР\_1}) P_{\text{ППМП}}(T_{0\_АФАР\_1}) [P_{\text{МВЖ}}(T_{0\_АФАР\_1})]^2\} \quad (3.60)$$

$$1 - [P_{\text{МВЖ}}(t_{\text{отк.}} = T_{0\_АФАР\_1})]^2 P_{\text{ППМП}}(t_{\text{отк.}} = T_{0\_АФАР\_1}) P_{\text{ППК}}(t_{\text{отк.}} = T_{0\_АФАР\_1}) = (n_G S_0 + 1) / G_0 S_0 \quad (3.61)$$

Під час експоненціального розподілу відмов ППК, ППМП і МВЖ для визначення середнього наробітку до відмови АФАР використовується формула:



$$T_{0\_АФАР} = - \frac{\ln[(n_G S_0 + 1) / G_0 S_0]}{\lambda_{\text{ППМП}} + \lambda_{\text{ППК}} + 2\lambda_{\text{МВЖ}}} \quad (3.62)$$

Метою дослідження моделі надійності передавальної АФАР є розроблення і дослідження узагальненої номограми для визначення залежності середнього наробітку до відмови від допустимого зниження коефіцієнта надмірності РЛС і графіків імовірності безвідмовної роботи, щільності розподілу імовірності відмов, інтенсивності відмов АФАР за різними законами розподілу відмов приймально-передавальних каналів:

- експоненціальному розподілі (прояв раптових відмов);
- дифузійному немонотонному розподілі, розподілі Вейбулла (прояв поступових відмов).

На рис. 3.14 представлена узагальнена номограма для розрахунку нормованого середнього наробітку до відмови АФАР на 256 модулів НВЧ за різними законами розподілу модулів решітки.

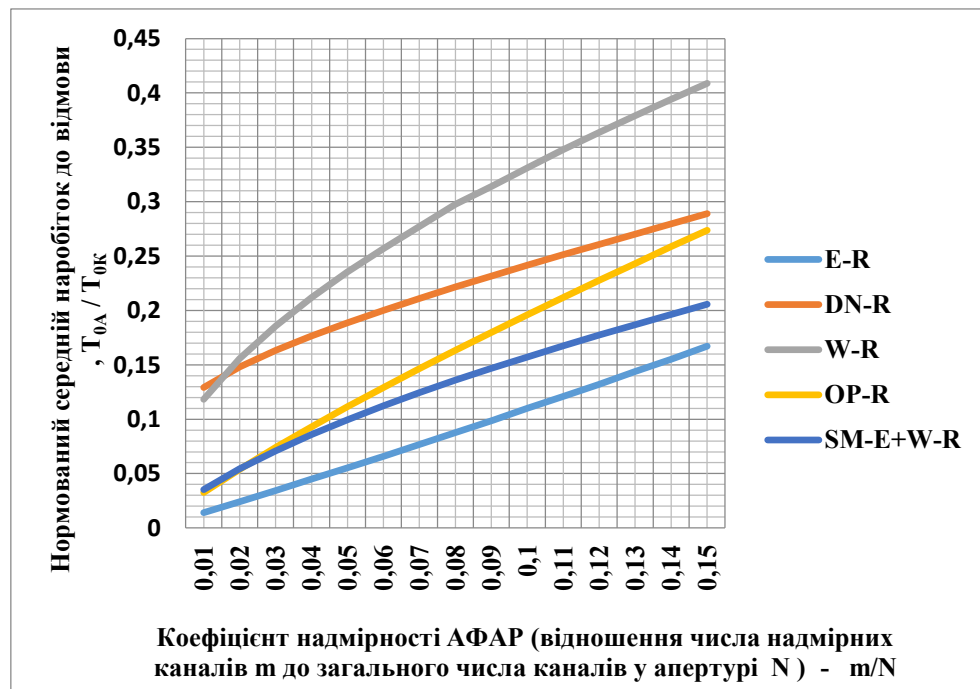


Рис.3.14 Номограма для визначення нормованого середнього наробітку до відмови АФАР, що складається із 256 модулів НВЧ, в залежності від коефіцієнта надмірності для п'яти різних законів розподілу часу до відмови НВЧ модулів

На рис. 3.15 – 3.17 представлені залежності імовірності безвідмовної роботи, щільності розподілу відмов і інтенсивності відмов АФАР для різних законів розподілу відмов ППК:

- під час допустимої кількості відмов ППК в антенній підрешітці -  $m_G = 7$ ;

- під час допустимої кількості умовних відмов антенних підрешіток в АФАР -  $m_S = 5$ ;

- під час допустимого зменшення максимальної дальності  $\frac{\Delta D}{D_0} = 0,0337$

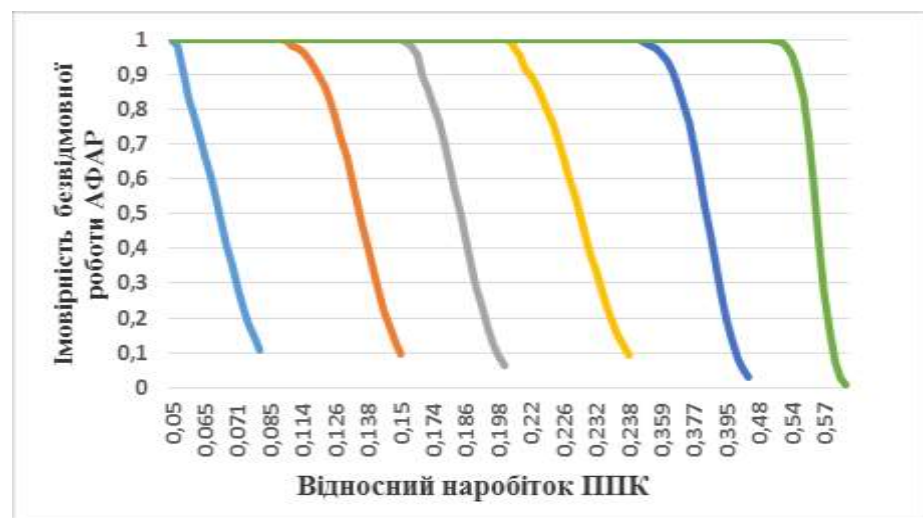


Рис. 3.15 Графіки залежності імовірності безвідмовної роботи АФАР від відносного наробітку ППК для різних законів розподілу відмов: ER - графік блакитного кольору; DNR - графік коричневого кольору; ER/2\*DNR/2 - графік фіолетового кольору; WR0 - графік жовтого кольору; WR1 - графік синього кольору; WR2 - графік зеленого кольору

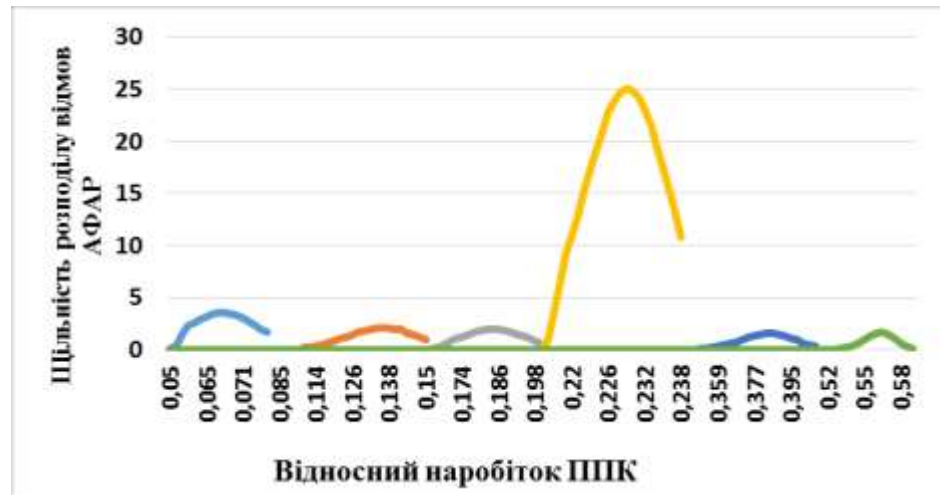


Рис. 3.16 Графіки щільності розподілу відмов АФАР від відносного наробітку ППК для різних законів розподілу відмов: ER - графік блакитного кольору; DNR – графік коричневого кольору;  $ER/2 \cdot DNR/2$  - графік фіолетового кольору; WR0 - графік жовтого кольору; WR1 - графік синього кольору; WR2 - графік зеленого кольору

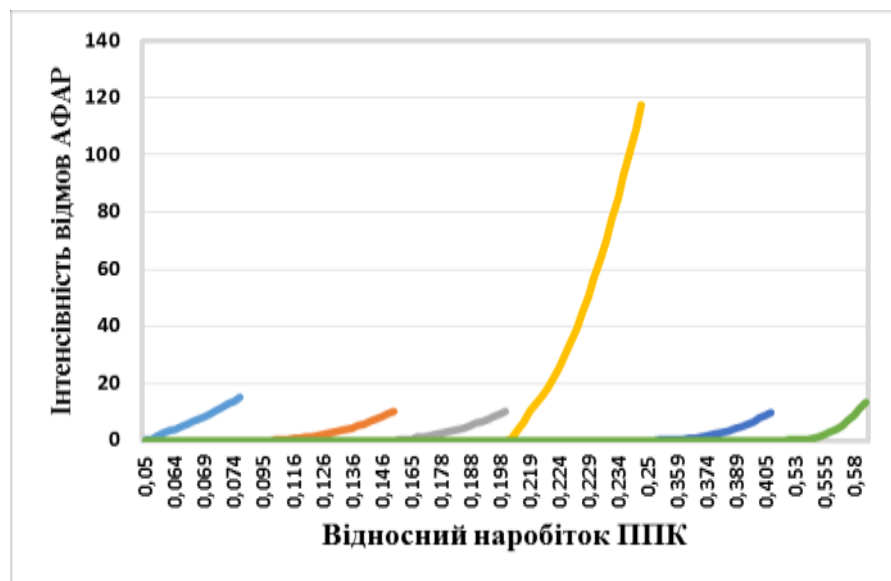


Рис. 3.17 Графіки залежності інтенсивності відмов АФАР від відносного наробітку ППК для різних законів розподілу відмов: ER - графік блакитного кольору; DNR - графік коричневого кольору;  $ER/2 \cdot DNR/2$  - графік фіолетового кольору; WR0 - графік жовтого кольору; WR1 - графік синього кольору; WR2 - графік зеленого кольору

*Аналіз кривих узагальненої номограми:*

Відносний середній наробіток до відмови АФАР змінюється від 0,01 до 0,40. Відносне погіршення коефіцієнта надмірності змінюється від 0,01 до 0,15.

З номограми на рис. 3.18 видно, що значення кривих для відносного середнього наробітку до відмови АФАР  $T_{0\_АФАР} / T_{0\_ППК}$  є мінімальними для експоненціального розподілу і максимальними - для дифузійного немонотонного розподілу (DNR) і розподілу Вейбулла (WR2).

### **3.7 Розроблення та дослідження математичної моделі залежності показників надійності АФАР РС від температури активної зони кристала нітрид-галієвих транзисторів і мікросхем випромінюючих каналів**

*Загальні положення*

Основним масовим елементом АФАР є приймально-передавальний канал (ППК). Приймально-передавальний канал - це основа просторового каналу обробки сигналу в АФАР. До його складу входить активний елемент – твердотільний підсилювач потужності на узгоджених транзисторних палетах. Для забезпечення можливості роботи пристрою як на прийом, так і на передачу, в ньому поділяють передавальний і приймальний канали. Поділ каналів здійснюється або комутатором, або циркулятором.

Під час розробки та виготовлення ППК широко використовувалися НВЧ- мікросхеми і транзистори, виконані за GaAs (арсенід-галієвою) технологією [20, 34]. Однак в останні роки (починаючи з 2000 - року) розробники під час проектування ППК стали широко застосовувати транзистори і мікросхеми, виконані з використанням GaN технології [20, 124-127].

Транзистори на нітриді галію, створені вперше у 1993 році, істотно розширили можливості приладів НВЧ-діапазону. Ці прилади здатні працювати

в значно ширшому діапазоні частот і при більш високих температурах, а також з більшою вихідною потужністю в порівнянні з приладами на кремнії, арсеніді галію, карбїду кремнію.

У порівнянні з GaAs монолітними інтегральними схемами, що випускаються серійно, нові вироби на основі GaN-транзисторів мають в 2-10 разів більшу вихідну потужність і порівнянний або більший коефіцієнт корисної дії при однакових або менших розмірах кристалів транзисторів.

Вартість АФАР становить не менше 50% від вартості РЛС. При цьому загальна вартість ППК, які формують АФАР, може становити до 85% від вартості АФАР в цілому.

Дослідження тимчасової стабільності параметрів і надійності GaN транзисторів, що проводилися інтенсивно при відпрацюванні промислових технологій, привели до досягнення прийнятних показників надійності для серійних приладів. Як приклад на рис. 3.18 приведена крива Арреніуса для потужних GaN-транзисторів на кремнієвій підкладці фірми Nitronex [20, 34]. Показано, що при температурі активної зони кристала  $150^{\circ}\text{C}$  і енергії активації  $E_a = 2.0$  середній час наробітку до відмови серійного приладу перевищує 107 годин. За допустимою робочою температурою кристала  $T_j = 200^{\circ}\text{C}$  середній наробіток до відмови становить 105 годин. Продемонстровано також стійкість приладів до неузгодженості навантаження до  $K_{СХН} = 10$  в режимі більшого сигналу. Швидке (протягом декількох годин) руйнування виникає в сучасних GaN-транзисторах при температурах активної зони  $320\text{-}350^{\circ}\text{C}$ .

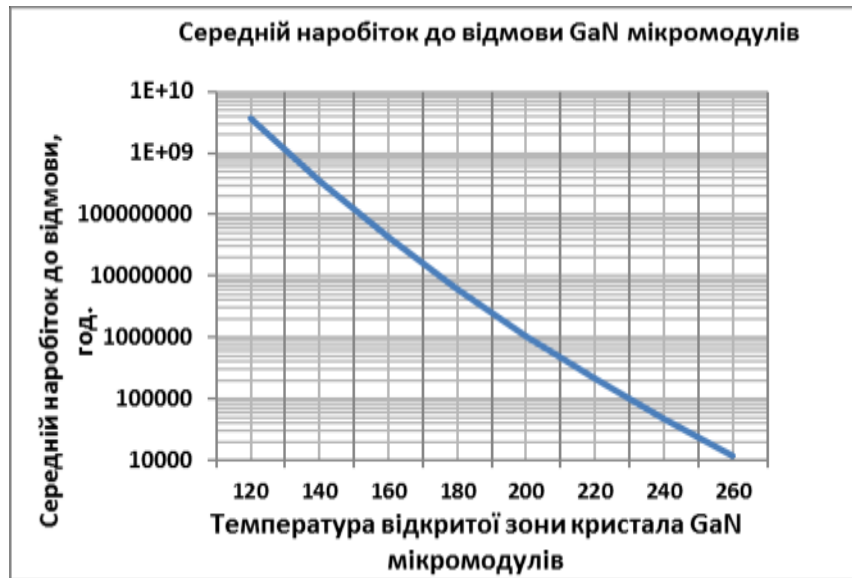


Рис. 3.18. Графік залежності середнього наробітку до відмови GaN мікромодулів від температури активної зони кристала мікромодулів

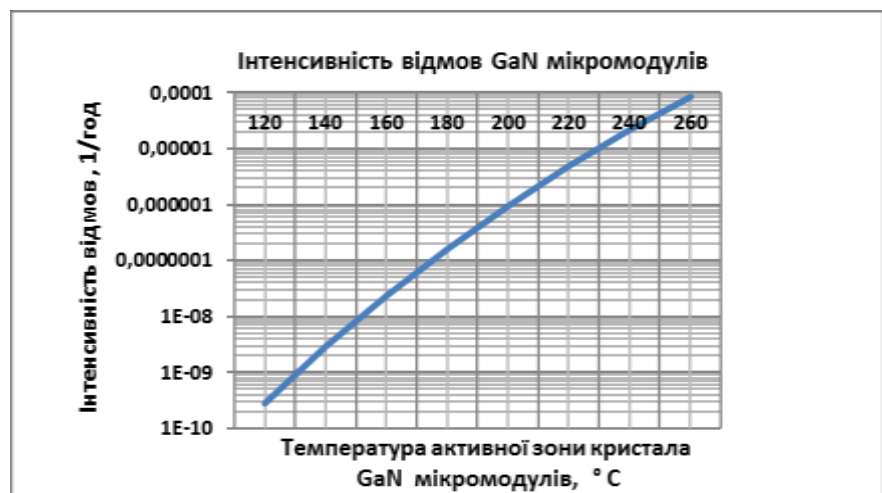


Рис. 3.19 Графік залежності інтенсивності відмов GaN мікромодулів від температури активної зони кристала НВЧ мікромодулів

Відповідно до [34, 123, 124] інтенсивність відмов GaN транзисторів визначається за формулою:

$$\lambda_{GaN} = \lambda_{GaN_{ref}} \times \pi_T, \quad (3.67)$$

де:  $\pi_T$ - температурний коефіцієнт моделі надійності GaN транзисторів

$$\pi_T = \exp\left[\frac{E_a}{k_0} \left(\frac{1}{\Theta_{op} + 273} - \frac{1}{\Theta_{ref.} + 273}\right)\right] \quad (3.68)$$

$\theta_e, \Theta$  – температура активної зони кристала GaN,

$\Theta_{REF}$  – рекомендована (оптимальна) робоча температура активної зони кристала GaN мікромодулів.



Рис. 3.20 Графік коефіцієнта температурної залежності GaN мікромодулів від температури активної зони кристала мікромодулів

Середній наробіток до відмови (MTTF) GaN транзисторів визначаються за формулою:

$$T_{0\_GaN} = \frac{1}{\lambda_{GaN}(\Theta_{ref}) \times \pi_{T\_GaN}} \quad (3.69)$$

З огляду на перспективи широкого використання GaN технології під час розробки випромінюючих приймально-передавальних каналів для нових РС з АФАР необхідно доцільно дослідити вплив температури активної зони кристала GaN транзисторів на показники надійності ППК, підрешіток і АФАР в цілому.

*Визначення залежності показників надійності АФАР РС від температури активної зони кристала GaN транзисторів ППМ*

Середній наробіток до відмови (MTTF) для ППМ, підрешітки і АФАР в цілому за експоненціальним розподілом відмов GaN транзисторів для різних

робочих температур активної зони кристала GaN мікромодулів визначаються за формулами:

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

$$T_{0\_ППК\_GaN} = \frac{T_{0\_ППК}(\theta_{ref})}{\pi_{T\_GaN}} \quad (3.70)$$

- середній час наробітку до відмови підрешітки АФАР:

$$T_{0\_ПДР\_GaN} = \frac{T_{0\_ПДР}(\theta_{ref})}{\pi_{T\_GaN}} \quad (3.71)$$

- середній час наробітку до відмови АФАР в цілому:

$$T_{0\_АФАР\_GaN} = \frac{T_{0\_АФАР}(\theta_{ref})}{\pi_{T\_GaN}} \quad (3.72)$$

В аналітичних виразах (3.70 – 3.72) представлені формули для обчислення середніх наробіток до відмови  $T_{0\_ППК}$ ,  $T_{0\_ПДР}$ ,  $T_{0\_АФАР}$  за рекомендованою (оптимальною) робочою температурою активної зони кристала GaN мікромодулів ( $\theta_{ref} = 200^\circ\text{C}$ ):

- інтенсивність відмов випромінюючого ППМ:

$$\lambda_{ППК\_GaN} = \sum_{j=1}^k l_j \lambda_{j\_GaN} \quad (3.73)$$

де  $k$  – кількість НВЧ транзисторів і мікросхем у випромінюючому приймально-передавальному модулі,  $\lambda_{j\_GaN}$  – інтенсивність відмов  $j$  – го GaN НВЧ транзистора (мікросхеми);

- середній наробіток до відмови випромінюючого приймально-передавального модуля

$$T_{0\_ППК}(\theta_{ref}) = \frac{1}{\lambda_{ППК}(\theta_{ref})} \quad (3.74)$$



*Приклад дослідження показників безвідмовності і довговічності АФАР РС від температури активної зони кристала GaN мікромодулів*

Як ілюстративний приклад розглянемо розрахунок середнього наробітку до відмови одного з варіантів структури досліджуємої АФАР. Будуть досліджуватися зміна показників надійності перспективної АФАР РС (розділ 3.2).

Використовуючи формули (3.15, 3.23, 3.24, 3.26) були визначені залежності показників надійності і ресурсу випромінюючих ППК, підрешітки АФАР і АФАР в цілому для різних значень температури активної зони кристала GaN мікромодулів.

На рис. 3.21 представлені графіки середнього наробітку до відмови випромінюючого каналу ППК, антенної підрешітки і АФАР в цілому.

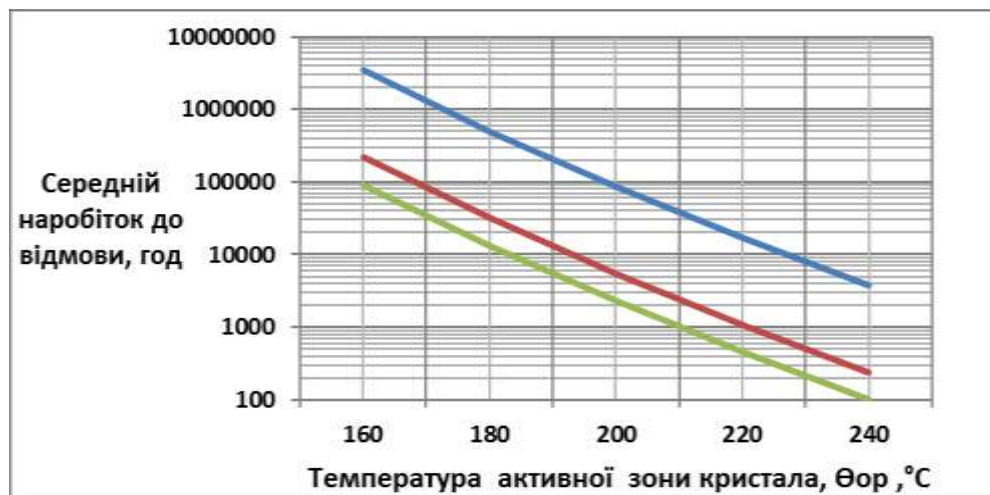


Рис.3.21 Графіки залежності середнього наробітку до відмови ППК ( $T_{0\_ППК}$  - крива синього кольору); підрешітки АФАР ( $T_{0\_ПДР}$  - крива червоного кольору) і АФАР в цілому ( $T_{0\_АФАР}$  - крива зеленого кольору) від температури активної зони кристала GaN мікромодулів ( $\theta_{op}$  °C)

На рис. 3.22 представлені графіки гамма-відсоткового ресурсу ( $\gamma = 90\%$ ) підрешітки АФАР і АФАР в цілому. На рис 3.23 представлені графіки імовірностей безвідмовної роботи АФАР за різними значеннями температури активної зони кристала GaN мікромодулів

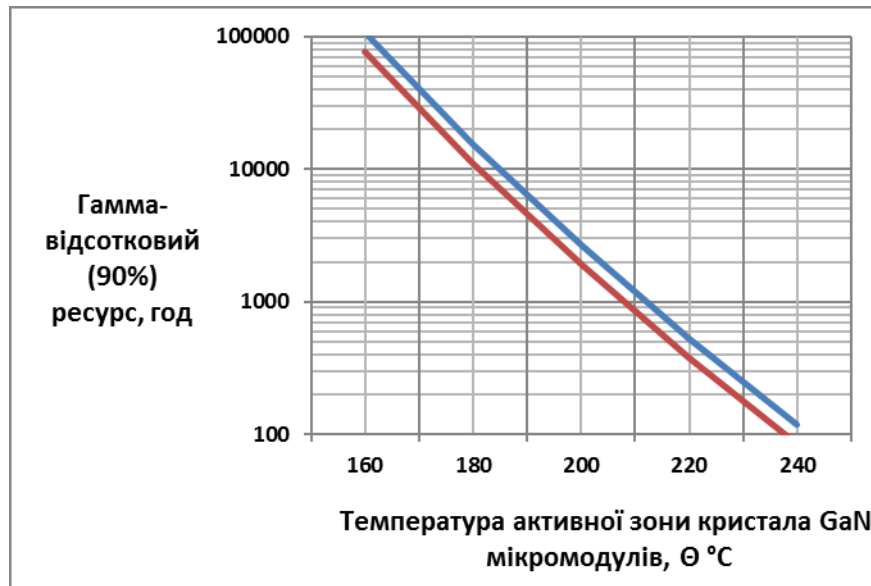


Рис. 3.22 Графіки залежності гамма-відсоткового ресурсу підретітки АФАР ( $T_{\gamma\text{-підр}}$  - крива синього кольору) і АФАР в цілому ( $T_{\gamma\text{-АФАР}}$  - крива червоного кольору) (при  $\gamma = 0,90$ ) від температури активної зони кристала GaN транзисторів і мікросхем

#### Обговорення отриманих результатів

а) Середній наробіток до відмови випромінюючих ППК, підретітки і АФАР в цілому є функцією температурного коефіцієнта моделі надійності GaN транзисторів  $\pi_{T\_GaN}$  ;

б) Прогнозування показників надійності АФАР для різних температур активної зони кристала GaN мікромодулів дозволяє на стадії ескізного проектування вибрати найбільш прийнятні варіанти структури АФАР і кількості випромінюючих приймально-передавальних модулів для забезпечення необхідних показників ефективності РС з АФАР.

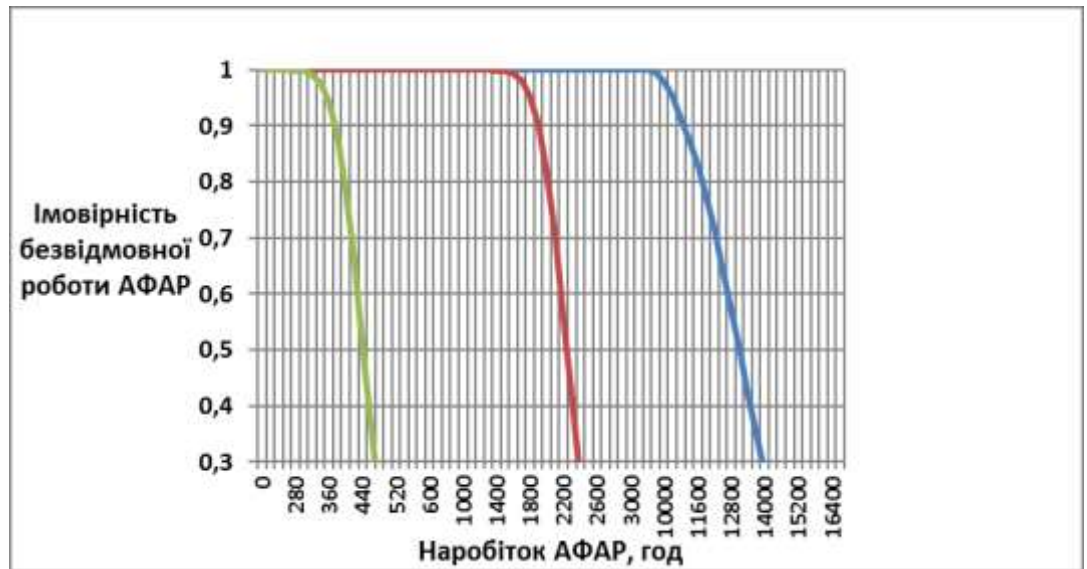


Рис. 3.23 Графіки імовірності безвідмовної роботи АФАР в залежності від наробітку за різними значеннями температури активної зони кристала GaN мікромодулів: 180°C - крива синього кольору; 200°C - крива червоного кольору; 220°C - крива зеленого кольору

### Висновки до третього розділу

1. Отримані результати для резервованих систем з загальним резервуванням із дробовою кратністю можуть знайти широке застосування у технічних додатках під час досліджень надійності активних фазованих антенних решіток радіоелектронних систем з 10% і 20% надмірністю для елементів розподільної структури, які характеризується довільними підрозділами відмов.

2. 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). Застосування моделі ЕР×ДНР при імовірнісному аналізі надійності АФАР на основі статистичних даних по ЕРВ дозволяє визначати реальні показники безвідмовності і довговічності АФАР і потрібну кількість запасних частин.

3. Розроблені та досліджені моделі надійності АФАР з однорівневою і дворівневою структурною схемою надійності і отримані прості формули для

розрахунку середнього наробітку до відмови за експоненціальним розподілом відмов (прояві раптових відмов) ППК і МВЖ, які можуть використовуватися під час розрахунку показників надійності приймальної і передавальної АФАР.

Для випадку прояву раптових відмов ППК і МВЖ в АФАР при експоненціальному розподілі відмов відносний наробіток до відмови АФАР приблизно збігається з відносною кількістю відмов ППК.

4. Дослідження моделей оцінки надійності АФАР показало, що значення відносного середнього наробітку до відмови АФАР  $T_{0\_АФАР\_1}/T_{0\_ППК}$  є мінімальними для експоненціального розподілу і максимальними - для дифузійного немонотонного розподілу (DNR) і розподілу Вейбулла (WR2). Значення  $T_{0\_АФАР\_1}/T_{0\_ППК}$  для композиції експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів ( $ER/2 \times DNR/2$ ) в два рази більше значень для експоненціального розподілу.

5. У роботі вперше побудована математична модель надійності АФАР в залежності від температури активної зони кристала GaN мікромодулів та визначений середній наробіток до відмови антенної підрешітки і АФАР для експоненціального закону розподілу відмов ППК.

6. Аналітичні залежності середнього наробітку до відмови випромінюючих ППК, антенної підрешітки і АФАР в цілому від температури активної зони кристала GaN мікромодулів є лінійними.

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

## **РОЗДІЛ 4**

# **МЕТОДИ І ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ З АКТИВНИМИ ФАЗОВАНИМИ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ**

### **4.1 Постановка завдання**

У четвертому розділі представлені практичні рекомендації щодо розрахунку надійності радіоелектронної системи в процесі проектування. Вдосконалений та досліджений метод розробки вимог до показників надійності каналів та модулів АФАР РС.

### **4.2 Практичні рекомендації щодо розрахунку надійності радіоелектронних систем з АФАР в процесі проектування**

#### **4.2.1 Загальні положення**

У процесі проектування надійність радіоелектронних систем розраховують на всіх стадіях життєвого циклу та етапах, які відповідають цим стадіям робіт, встановлених програмою забезпечення надійності в процесі розроблення (далі ПЗНр) системи або документами, які її заміняють [84, 85, 89, 92].

ПЗНр має встановлювати цілі розрахунку на кожному етапі видів робіт, що використовуються під час розрахунку нормативні документи та методики, строки виконання розрахунку та виконавців, порядок оформлення, представлення та контролювання результатів контролю.

#### 4.2.2 Цілі розрахунку надійності радіоелектронної системи

Розрахунок надійності радіоелектронної системи на конкретному етапі видів робіт, який відповідає певній стадії його життєвого циклу, може мати такі цілі:

1. Обґрунтування кількісних вимог щодо надійності системи або її складових частин.

2. Перевірка виконання встановлених вимог та (або) оцінювання імовірності досягнення певного рівня надійності системи у встановлені строки при виділених ресурсах, обґрунтування необхідних корегувань встановлених вимог.

3. Порівняльне аналізування надійності варіантів схемно-конструктивної побудови системи та обґрунтування вибору раціонального варіанта.

4. Визначення досягнутого (очікуваного) рівня надійності системи та (або) її складових частин, у тому числі розрахункове визначення показників надійності або параметрів розподілу характеристик надійності складових частин системи у якості вихідних даних для розрахунку надійності системи в цілому.

5. Обґрунтування та перевірка ефективності запропонованих (реалізованих) заходів щодо доопрацювання конструкції, технології виготовлення, системи технічного обслуговування та ремонтування системи, спрямованих на підвищення його надійності.

6. Рішення різних оптимізаційних задач, у яких показники надійності виступають у ролі цільових функцій, керуючих параметрів або граничних умов, у тому числі таких, як оптимізація структури системи, розподіл вимог щодо надійності між показниками окремих складових надійності (наприклад безвідмовності та ремонтпридатності), розрахунок комплектів ЗІП, оптимізація систем технічного обслуговування та ремонтування,

обґрунтування гарантійних строків та назначених строків служби (ресурсу) системи тощо.

7. Перевірка відповідності очікуваного (досягнутого) рівня надійності системи встановленим вимогам (контролювання надійності), якщо пряме експериментальне підтвердження їх рівня надійності неможливе технічно або недоцільно економічно.

#### **4.2.3 Загальна схема розрахунку радіоелектронних систем**

Розрахунок надійності радіоелектронної системи у загальному випадку представляє собою процедуру послідовного поетапного уточнення оцінок показників надійності по мірі відпрацювання конструкції та технології виготовлення системи, алгоритмів його функціонування, правил експлуатування, систем технічного обслуговування та ремонтування критеріїв відмов та граничних станів, накопичення більш повної та достовірної інформації про всі фактори, які визначають надійність та використання більш адекватних та точних методів розрахунку та розрахункових моделей.

До розрахунку надійності на будь-якому етапі видів робіт, які передбачені планом ПЗНр входить:

- ідентифікація система, який підлягає розрахунку;
- визначення цілей та завдань розрахунку на даному рівні, номенклатури та даних, що вимагаються, розрахункових показників надійності;
- вибір методу чи методів розрахунку, адекватного особливостям об'єкта, цілям розрахунку, наявності необхідної інформації про об'єкт та при необхідності їх зіставлення із тим що вимагається;
- оформлення, представлення та захист результатів розрахунку.

#### 4.2.4 Ідентифікація радіоелектронних систем

Ідентифікація системи для розрахунку його надійності містить отримання та аналізування наступної інформації про систему, умови його експлуатування та інші фактори, які визначають його надійність:

- призначення області застосування та функцій системи;
- критерії якості функціонування відмов та граничних станів, можливі наслідки відмов (досягнення об'єктом граничного стану) системи;
- структуру системи, склад, взаємодію та рівні навантаження елементів які входять у систему, можливість перебудови структури та (або) алгоритмів функціонування системи при відмовах окремих його елементів;
- наявність видів та способів резервування, які використовуються у системі;
- типову модель експлуатування системи, яка встановлює перелік можливих режимів експлуатування та виконання при цьому функцій, правила та частоту чергування режимів, тривалість перебування системи в кожному режимі, номенклатуру та параметри навантажень та зовнішніх впливів на систему в кожному режимі;
- заплановану систему технічного обслуговування та ремонтування об'єкта, яка характеризується видами, періодичністю, організаційними рівнями, способами виконання, технічним оснащенням та матеріально-технічним забезпеченням робіт за його ТО та ремонтуванням;
- розподіл функцій між оператором та засобами автоматичного діагностування (контролювання) та керування системою, види та характеристики людино-машинних інтерфейсів, які визначають параметри працездатності та надійності робіт операторів;
- рівень кваліфікації персоналу;
- якість програмних засобів, які використовуються у системі;
- заплановані технології та організації виробництва при виготовленні системи.



Повнота кваліфікації радіоелектронної системи на етапі розглядання розрахунку його надійності визначається вибором відповідного методу розрахунку, який забезпечує допустиму на даному етапі точність при відсутності.

Джерелом інформації для ідентифікації системи служить конструкторська, технологічна, експлуатаційна та ремонтна документація на систему в цілому, його складові частини та комплектуючі вироби у складі та комплектах, які відповідають цьому етапові розрахунку надійності.

#### **4.2.5 Методи розрахунку радіоелектронних систем**

Методи розрахунку радіоелектронної системи надійності розподіляють за:

- складом показників надійності, що розраховуються;
- основними принципами розрахунку.

За складом показників надійності, що розраховуються розрізняють методи розрахунку:

- безвідмовність;
- ремонтпридатність;
- довговічність;
- зберігання;
- комплексних показників надійності (методи розрахунку коефіцієнтів готовності, технічного використання, зберігання ефективності тощо).

За основними принципами розрахунку засобів, які складають надійність, або комплексних показників надійності систем розрізняють :

- методи прогнозування;
- структурні методи розрахунку;
- фізичні методи розрахунку.

Методи прогнозування засновані на використанні для оцінки очікуваного рівня надійності системи даних про досягнені значення та

виявлені тенденції зміни показників надійності системи, аналогічних або близьких до тих що розглядаються за призначенням, принципам дії схемно-конструктивній побудові та технології виготовлення, елементною базою та матеріалами, які використовуються, умовами та режимами експлуатування, принципами та методами управління надійністю (далі виробів-аналогів).

Структурні методи розрахунку засновані на представлені системи у вигляді логічної (структурно-функціональної) схеми, яка описує залежність станів та переходу від станів із врахуванням їх взаємодії та виконання ними функцій в системі з послідовними описами побудови структурної моделі адекватною математичною моделлю та обчисленням показників надійності системи за відомими характеристиками надійності його елементів.

В основі фізичних методів розрахунку лежить застосування математичних моделей, які описують фізичні, хімічні та інші процеси, які призводять до відмов радіоелектронної системи (досягнення системою граничного стану), та обчислення показників надійності за відомими параметрами навантаження системи, характеристиками застосованих в системі речовин та матеріалів з урахуванням особливостей його конструкції та технології виготовлення.

Методи розрахунку надійності конкретної системи обирають в залежності від:

- цілей розрахунку та вимог до точності визначення показників надійності системи;
- наявності та (або) можливості отримання вихідної інформації необхідної для застосування конкретного методу розрахунку;
- рівня відпрацювання конструкції та технології виготовлення радіоелектронної системи, системи її технічного обслуговування та ремонтування, який дає можливість застосовувати відповідні розрахункові моделі надійності.

При розрахунку надійності конкретних систем можливо одночасне застосування різноманітних методів, наприклад методів прогнозування

надійності електронних та електротехнічних елементів з послідовним використанням отриманих результатів у якості вихідних даних для розрахунку надійності системи в цілому або його складових частин різними структурними методами.

### 4.3 Метод розробки вимог до показників надійності каналів та модулів АФАР РЛС

#### 4.3.1 Загальні положення

Основними найбільш масовим і ненадійним типом модулів антенної решітки, що визначає надійність АФАР, є антенний приймально-передавальний модуль (АППМ), який конструктивно може включати до свого складу кілька приймально-передавальних каналів (ППК) [46]. Якщо вимоги до середнього наробітку до відмови ППК прирівняти до 1,00 (одиниці), то вимоги до середнього наробітку до відмови приймально-передавальних модулів підрешітки (ППМП) і модулів вторинного живлення повинні бути в 10 (десять раз) менш жорсткі, тобто вимоги необхідно прирівнювати, відповідно, до 0,100:

$$T_{0\_ППК} = 0,10 T_{0\_ППМП} = 0,10 T_{0\_МВЖ}$$

#### 4.3.2 Вимоги до надійності ППК для експоненціального розподілу

відмов

*За критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС*

Відношення середнього наробітку до відмови АФАР до середнього наробітку до відмови ППК визначається за формулою (3.22)

$$\frac{T_{0\_АФАР}}{T_{0\_ППК}} = - \frac{\ln\left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0 S_0}\right)}{1 + \frac{T_{0\_ППК}}{T_{0\_ППМП}} + \frac{2T_{0\_ППК}}{T_{0\_МВЖ}}} \quad (4.1)$$

Якщо допустиме зниження максимальної дальності РЛС дорівнює 0,10 -  $(\Delta D/D_0)_{\text{доп.}} = 0,10$ , то з урахуванням основного рівняння радіолокації для допустимої відносної кількості відмов ППК маємо:  $\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_{\text{доп.}} \approx 2(\Delta D/D_0)_{\text{доп.}} = 0,20$ . Тоді за значеннями  $\frac{T_{0\_ППК}}{T_{0\_ППМП}} = 0,10$ ;  $\frac{2T_{0\_ППК}}{T_{0\_МВЖ}} = 0,20$ ,  $N_0 = G_0 S_0 = 6400$  ППК, для формули (3.22) маємо [36]:

$$\frac{T_{0\_АФАР\_1}}{T_{0\_ППК}} = - \frac{\ln\left(1 - 0,20 - \frac{1}{6400}\right)}{1 + 0,10 + 0,20} = 0,172 \quad (4.2)$$

Тобто, для забезпечення допустимого зниження максимальної дальності не більше ніж 10% необхідне значення середнього наробітку до відмови ППК має бути не менше значення, що дорівнює  $(T_{0\_АФАР})_{\text{тр.}}/0,172$ :

$$(T_{0\_ППК})_{\text{вим.}} = \frac{(T_{0\_АФАР})_{\text{вим.}}}{0,172} = 5,82 (T_{0\_АФАР})_{\text{вим.}} \quad (4.3)$$

4.3.3 Вимоги до надійності ППК для композиції відмов експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів

Для композиції експоненціального (ЕР) і дифузійного немонотонного (ДНР) розподілів (при 50% раптових і поступових відмовах ППК), вимоги до середнього наробітку до відмови ППК повинні бути в два рази легші, тобто мати значення за критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС:

$$(T_{0\_ППК})_{\text{вим.}} = 2,91 (T_{0\_АФАР})_{\text{вим.}} \quad (4.4)$$

### Висновки до четвертого розділу

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

2. Розроблення та забезпечення вимог до показників надійності складових частин РЛС з АФАР дозволяє отримати значний економічний ефект у розмірі 10% - 20% під час створення нової техніки.

## ВИСНОВКИ

Вирішено актуальне науково-прикладне завдання, яке полягає у розробленні математичних моделей оцінки надійності радіоелектронних систем з АФАР, що дозволило визначити нові підходи до проектування радіоелектронних систем.

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

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

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

4. Вперше розроблений метод та математична модель оцінки надійності АФАР радіоелектронних систем в залежності від температури активної зони

кристалів GaN (нітриду галію) мікромодулів, що дозволяють вибрати оптимальну структуру системи рідинного охолодження.

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

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

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акулова Л.Г. О стохастической сложности вычисления надежности булевских систем. Ярославль, ЯГУ, 1983. 345 с.
2. 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. 35 – 43.
3. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств. Учебно-методическое пособие. Под редакцией С.М. Боровикова, Минск, БГУИР, 2010 . 68 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969, 576 с.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Изд. Академия, 2003. 464 с.
6. Ветрова Н.А., Хныкина С.В., Шашурин В.Д. К вопросу о прогнозировании качества смесителей радиосигналов на основе РТД на этапе их сборки. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2010. №4. С. 30–37.
7. Ветрова Н.А., Иванов Ю.А., Шашурин В.Д. Исследования закономерностей формирования постепенных отказов СВЧ смесителей радиосигналов нового поколения на резонансно-туннельных нанодиодах. *Наноинженерия* 2012. №1. С. 32–36.
8. Викулов И. Радиоэлектронные системы с АФАР: направления развития и применения. *Электроника. Наука, технология, бизнес*. №5 (00165) 2017. С. 126 – 134.
9. Викторова В.С. , Кунтшер Х.П., Петрухин Б.П., Степанянц А.С. Relex – программа анализа надежности, безопасности, рисков. *Надежность*. 2003, №4 (7). С.42-64.



10. Викторова В.С. , Степанянц А.С. Использование модулей Relex при анализе надежности и безопасности систем. *Надежность*, 2004, №2 (9). С. 64-71.
11. Викторова В.С. , Степанянц А.С. Анализ программного обеспечения моделирования надежности и безопасности систем. *Надежность*. 2006, №4 (19). С. 46-57.
12. Викторова В.С. , Кунтшер Х.П., Степанянц А.С. Обзор программных разработок по анализу надежности и безопасности систем. *Труды международной конференции «Программные продукты информационного обеспечения безопасности полетов, надежности»*. С. 34 – 45.
13. Викторова В.С., Ведерников Б.И., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Моделирование и анализ контролепригодности бортовых систем самолетов. *Надежность*. 2007, №3 (22). С.62-71.
14. Викторова В.С., Свердлик Ю.М., Степанянц А.С. Анализ надежности систем сложной структуры на многоуровневых моделях. *Автоматика и Телемеханика*. 2010, №7. С.143-148.
15. Викторова В.С., Свердлик Ю.М., Степанянц А.С. Анализ надежности газоснабжения потребителей природного газа на объектах ОАО «ГИПРОГАЗЦЕНТР». *Сб. трудов VI Международной конференции MMR 2009. Математические методы в теории надежности*. М., 2009. С. 538 – 542.
16. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. Изд. «Сов. Радио», 1966. 165 с.
17. 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)*

18. Гудков А.Г. Разработка принципов и методов комплексной технологической оптимизации радиоэлектронных средств для различных этапов их жизненного цикла. Диссертационная работа докт. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 332 с.
19. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности: Основные характеристики надежности и их статистический анализ. Изд.2. М.: URSS, 2013. 584 с.
20. Данилин В., Жукова Т., Кузнецов Ю., Тараканов С. , Уваров Н. Транзистор на GaN самый «крепкий орешек» // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2005, №4. С. 20-29.
21. Ермолаев Ю.П., Насыров И.К., Застела М.Ю., Пьянков Б.Л. Оценка показателей качества на этапах проектирования и производства электронных устройств в условиях применения высоких технологий. *Казань, изд. Новое знание*, 2006. 96 с.
22. Ефремов Л.В. Практика инженерного анализа надежности судовой техники. *Ленинград. Изд. «Судостроение»*. 1980. 176 с.
23. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента.- *М.: Атомиздат*, 1978. 230 с.
24. Заренин Ю.Г. Контрольные испытания на надежность. *М.: Изд-во стандартов*. 1970. 214 с.
25. Заренин, Ю. Г., Стоянова И.И. Определительные испытания на надежность. *М. : Изд-во стандартов*. 1978. 168 с.
26. Иванов Ю.А., Мешков С.А., Синякин В.Ю., Федоркова Н.В., Федоров И.Б., Шашурин В.Д., Федоренко И.А. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов. *Наноинженерия в приборостроении*, 2011, № 1. С. 34–43.
27. Иванов Ю.А., Мешков С.А., Синякин В.Ю., Федоренко И.А., Федоркова Н.В., Федоров И.Б., Шашурин В.Д. Повышение показателей качества

радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов (продолжение). *Наноинженерия в приборостроении*. 2011, № 2. С. 20–22.

28. Модели надёжности сложных технических систем [ Электроний ресурс] / Виктор Каганов (M.Sc). С. 1 – 15. Режим доступа: [http: www.viktorkaganov@gmail.com](http://www.viktorkaganov@gmail.com),
29. Каганов В.Л. К вопросу обеспечения надёжности изделий путём ограничения нагрузки.- *В сб. Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов*, вып. 9, Куйбышев, КуАИ, 1982. С.83-90.
30. Каганов В.Л., Капитонов В.А. Обобщённая модель надёжности и отработочные испытания.- *В сб. Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов*, вып. 10, Куйбышев, КуАИ, 1984. С. 83-90.
31. Каганов В.Л. О возможности применения обобщённой модели надёжности. *ЦНТИ „Поиск”*, ПТО, вып. 7-8, 1987. С. 23 – 56.
32. Каганов В.Л. Инженерная логика обеспечения надёжности сложных систем. *Вестник Дома учёных, Хайфа*. том XX, 2010. С. 34 – 42.
33. Каганов В.Л. Прогнозирование вероятностных характеристик технических систем. *Вестник Дома учёных, Хайфа*. том XXVII, 2012. С. 27 – 35.
34. Кищинский А.А. Твердотельные свч усилители мощности на нитриде галлия - состояние и перспективы развития. *ЗАО «Микроволновые системы»*. Доклад опубликован в материалах 19 Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, Вебер, 2009 г. С. 45 -55.
35. 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 (91), 2018. P. 20-31 (*Журнал включено до НМБД SCOPUS*)

36. 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). P. 31-40. (Журнал включено до НМБД **SCOPUS**)
37. Козачук О.Д. Дослідження впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності резервованих систем з дробовою кратністю. *Науковий журнал «Математичні машини і системи» НАНУ*. 2015 р. №1. С.171-177.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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»*. № 1, 2017. С. 122-127.
42. 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. №4 (40), 2018. С. 465-472.
43. 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. №1, 2020. С. 1-10.
44. 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. №3, 2020. С. 276-286.
45. 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.
46. Козачук О.Д., Костановський В.В., Мачалін І.О. Розробка методу та визначення вимог до показників надійності каналів і модулів активної фазованої антенної решітки. *Науковий журнал «Наукоємні технології»*, НАУ. №4, 2020. С. 263-269.
47. 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.
48. 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.*

49. 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 на II науковій 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.*
50. 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.*
51. 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.*
52. Козачук О.Д. Оценка надежности импортной элементной базы в процессе разработки авиационной радиоэлектронной аппаратуры НАУ. *«Проблеми навігації і управління рухом» Всеукр. наук.-практ. конф., 18-20 листопада 2013 р.: тези доп. - НАУ, 2013. С. 103.*
53. Козачук О.Д. Исследование надежности систем с общим нагруженным резервированием с дробной кратностью при различных законах распределения времени безотказной работы элементов, учитывающих внезапные и постепенные отказы. *НАУ. «Проблеми розвитку глобальної*

системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM. Наук.-техн. конф., 17-19 листопада 2014 р.: тези доп., м. Київ, 2014. С. 62.

54. Костановский В.В. Математическая модель расчета надежности невосстанавливаемых фазированных антенных решеток. *Измерительная техника*. № 1- 2014, Москва. С. 56 -59.
55. Можаяев А.С., Алексеев А.О. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и вероятностный анализ сложных систем. В сб. «Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем», вып. 2, под ред. И.А. Рябинина, СПб, 1994. С. 17-42.
56. Острейковский В.А. Теория Надежности. М.: Изд. “Высшая Школа”, 2003. 463 с.
57. Прытков С. Ф. Надежность ЭРИ: Справочник / С. Ф. Прытков, В. М. Горбачева, А. А. Борисов и др. М.: 22 ЦНИИИ МО РФ, 2006. 674 с.
58. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. 2-е изд., Санкт-Петербург, 2006. 704 с.
59. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей. Издательство “Наука”. Главная редакция физико-математической литературы, 1968. 368 с.
60. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.
61. Рябинин И.А., Парфенов Ю.М. Надежность, живучесть, безопасность корабельных электроэнергетических систем. / СПб.: Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова, 1997, 430 с.
62. Рябинин И.А., Парфенов Ю.М. Определение “веса” и “значимости” отдельных элементов при оценке надежности сложной системы. *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1978. №6. С. 22 – 32.
63. Рябинин И.А. Задача № 35 и история ее исследований. *Морской Вестник*, №4 (8), 2003, - С. 48-51.

64. Рыбников К.А. Введение в комбинаторный анализ. М.: Наука, 1985, 308 с.
65. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Изд. С.- Петерб. ун-та, 2007. 276 с.
66. Стрельников В.П., Новая технология исследования надежности машин и аппаратуры. АН УССР. *Математичні машини і системи*, 2007, №3, 4. С. 457 - 468.
67. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
68. Стрельников В.П., Новая технология исследования надежности машин и аппаратуры. АН УССР, *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем НАН України «Математичні машини і системи»*. 2007, №1, 2. С. 346 – 364.
69. Андрей Строганов. Оценка долговечности БИС по результатам испытаний. *Журнал “Технология в электронной промышленности”*, № 3, 2007, С. 26 – 38.
70. Черняк А.А. Комбинаторно-графовый метод анализа надежности сложных систем с монотонными булевыми функциями. *А и Т*. 1991, №4, С. 165-174.
71. Черняк А.А., Черняк Ж.А. Логико-вероятностный метод анализа надежности многозначных систем большой размерности. *А и Т*. 1998, №1, С.171-180.
72. Шкляр В.Н. Надежность систем управления: учебн. пособ. Шкляр В.Н. – Томск: Томский политехнический университет, 2009. 126 с.
73. Филин, Б. П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. М.: Радио и связь, 1988. 203 с.
74. Филин Б.П. О принципе дуальности в задачах анализа структурной надежности сложных систем . *А и Т*. 1989, №6. С.158-172.
75. Филин Б.П. Об аналитическом методе приближенного вычисления надежности сложных систем. *А и Т*. 1982, №11. С.159-170.



76. Хевиленд Р. Инженерная надёжность и расчёт на долговечность. Пер. с англ. М. Л.: Энергия, 1966. 231 с.
77. Надёжность и эффективность в технике. Справочник в 10 томах. Под редакцией академика АН Украины Б.В. Гнеденко. «Машиностроение», Москва, 1987 г., Том 10, «Машиностроение», Москва, 1990 г. С. 130-131.
78. Справочник. Надёжность электрорадиоизделий. Санкт-Петербург: РНИИ «Электронстандарт», 2002. 574 с.
79. ОЖ0.464.181 ТУ. Конденсаторы оксидно-электролитические алюминиевые К50-29. РФ. 12 с.
80. ОЖ0.464.136 ТУ. Конденсатор танталовый К53-18. РФ. 15 с.
81. Единый справочник «Надёжность электрорадиоизделий, Минобороны СССР, ЦНИИ «Электронстандарт». редакция 1990 г. 345 с.
82. Справочник. Надёжность 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.
83. Степанянц А.С. Вычисление параметра потока отказов в логико-вероятностных моделях методом рекурсивного наращивания переменных.- *Автоматика и Телемеханика*, № 9, 2007. С. 161- 175.
84. ДСТУ 2860-94 Надёжность техники. Термины и определения, Действует с 01.01.1996, Держстандарт України [Чинний від 1996.01.01], - 35 с.
85. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги, Держстандарт України, Київ, [Чинний від 01.01.97]. 17 с.
86. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Держстандарт України. Київ, [дії з 01.01.1997]. 32 с.
87. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд. стандартов, 1990. 37 с.
88. ГОСТ 27.005-97 Стандарт РБ. Надёжность в технике. Модели отказов. Основные положения. Введен в действие постановлением Госстандарта Республики Беларусь от 28 марта 2005 г. № 12 непосредственно в

качестве государственного стандарта Республики Беларусь с 1 октября 2005 г. 45 с.

89. 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), Переиздание. Июль 2020 г., 2020 г., 48 с.
90. 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, 38 с.
91. ГОСТ РВ 20.39.413-97 Комплексная система общих технических требований. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Требования по надежности *РНИИ «Электронстандарт», РФ г. Санкт-Петербург: 1997. 7 с.*
92. ГОСТ В 20.57.304-76 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Общие технические требования, методы контроля и испытаний. Методы оценки соответствия требованиям по надежности / Госкомитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам: 1976. 139 с.
93. 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 . 455 p.*
94. 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, Kyiv : 2017 - № 1 (51) P. 59 – 67.*
95. MIL-HDBK-217F, 2 December 1991, Reliability prediction of electronic equipment with MIL-HDBK-217F, Notice 2, 28 February 1995 (Военный справочник США MIL-HDBK-217F для прогнозирования надежности

- электрорадиоэлементов”, редакция 1991г.) 260 р. / с корректировкой №2 от 28.02.1995. 80 р.
96. 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”). 96 р.
  97. Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment (Английский справочник NSWC-98 для прогнозирования надежности морского механического и электромеханического оборудования”, редакция 2000 г.). 315 р.
  98. IEC 61709 Electric components – Reliability. Reference conditions for failure rates and stress models for conversion, 2010. 181 р.
  99. Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, 2000 . 234 р.
  100. Handbook of 217 Plus Prediction Models, 2004. 256 р.
  101. V. Kostanovskyi, I. Machalin, O. Kozachuk, I. Terentyeva. 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. С. 31-40.
  102. Strelnikov V. The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 1. *RAC Journal*. 2001. № 1. P. 1–4.
  103. Strelnikov V. The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 2 . *RAC Journal*. 2001. № 2. P. 8–10.
  104. Barlow RE, Proschan F. (1965) Mathematical theory of reliability. Wiley - NewYork. 255 р. / Математическая теория надежности [Текст]: - Перевод с английского проф. Ушакова И.А. под редакцией акад. Гнеденко Б.В. М.: Сов. радио, 1969. С. 488.
  105. Drechsler R., Becker B. Binary Decision Diagrams. Theory and Implementations. *Springer*, 2010. P. 210.

106. Pandle P.K. et al. Computerized Fault Tree Analysis: TREEL and MICSUP. – *Operational Research Center. University of California. Berkeley. ORC 75-3.* April 1975. 232 p.
107. Rauzy A. New Algorithms for Fault Tree Analysis. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 40, 1993, P. 203-211.
108. Rauzy A. Toward an efficient implementation of the MOCUS algorithm. *IEEE Transactions on Reliability*, Volume 52, Issue 2, June 2003 Page(s): P. 175 – 180.
109. Sinnamon R., Andreas J. Fault Tree Analysis and Binary Decision Diagrams. *Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium*. January 1996, P. 215-222.
110. Zhou Jinglun, Sun Quan. Reliability analysis based on binary decision diagrams. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 1998, vol.4, issue 2. P. 150-161.
111. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications. NASA, 2002, P. 205.
112. Woo Sik Jung, Sang Hoon Han and Jaejoo Ha. A fast BDD algorithm for large coherent fault trees analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 2004, Vol. 83, Issue 3. P. 369-374.
113. Remenyte R.; Andrews, J.D. A simple component connection approach for fault tree conversion to binary decision diagram. *Availability, Reliability and Security, 2006. ARES 2006. The First International Conference, 20-22 April 2006* . P. 8 .
114. Wierman T.E., Rasmuson D.M., Stockton N.B. Common-Cause Failure Event Insights. *Circuit Breakers. NUREG/CR-6819, Vol. 4, INEEL/EXT-99-00613*, May 2003. P. 150.
115. Mosleh A., Fleming K., Parry G., Paula H., Worledge D., Rasmuson D. Procedures for treating common cause failure. *Safety and Reliability Studies. NUREG/CR4780 EPRI NP-5613*, vol. 1, Jan. 1988, 148 p.

116. Meng F.C. Relationships of Fussell-Vesely and Birnbaum importance to structural importance in coherent systems. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.67, Num.1, January 2000, P. 55- 60.
117. Meng F.C. Comparing Birnbaum importance measure of system components. *Probability in Engineering and Informational Sciences*, 2004, № 18, P. 237-245.
118. Wendai Wang; Loman J.; Vassiliou P. Reliability importance of components in a complex system. *Reliability and Maintainability, 2004 Annual Symposium RAMS*, P. 6 – 11.
119. Borgonovo E. Differential, criticality and Birnbaum importance measures: An application to basic event, groups and SSCs in event trees and binary decision diagrams. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 92, Issue 10, October 2007, P. 1458-1467
120. Spiridonov I., Stepanyants A., Victorova V. Design testability analysis of avionic systems. *Reliability: Theory and Applications (RT&A) # 03 (26) (Vol.7)* 2012, September, P. 66-73.
121. Ng Y.W., Avizienis A.A. A unified reliability model for fault tolerant computers. *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-29, no.11, Nov. 1980, P. 1002-1011.
122. Reliability: A Practitioner's Guide. *London: Intellect, The Information Technology Telecommunications and Electronics Associations*, 2003, P. 294. 217
123. T2G6001528-SG: 15W, 28V, DC – 6 GHz, GaN RF Power Transistor , P. 1-25 [Електронний ресурс] / Datasheet: Rev A- 02-27-14 Disclaimer: Subject to change without notice © 2014 TriQuint, <http://www.triquint.com>
124. TriQuint Semiconductor Texas, Gallium Arsenide Products Designers' Information, P. 1- 31, [Електронний ресурс] / Copyright 1992, TriQuint Semiconductor, Incorporated, [http:// www.triquint.com](http://www.triquint.com)
125. MIL-M-38510 Microcircuits, General Specification for, USA.

126. MIL-I-38535 Integrated Circuits (Microcircuits) Manufacturing, General Specification for, USA. 342 p.
127. MIL-H-38534 Hybrid Microcircuits, General Specification for, USA. 415 p.
128. MIL-STD-883E Test Methods and Procedures for Microelectronics, USA. 681 p.
129. XILINX Device Reliability Report Fourth Quarter 2010UG116 (v5.12) February 1, 2011. 182 p.
130. ALTERA Reliability Report, 50, Q3, 2010. 78 p.

## ДОДАТОК А

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Kostanovsky V., Kozachuk O., Rusniak I. Development of the algorithm of reliability centered maintenance of phased array antennas. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 1/9. P. 32-38. [http://doi/10.15587/1729 - 4061.2018.123591](http://doi/10.15587/1729-4061.2018.123591) (Особовий внесок – брала участь у розробленні програми розрахунку методу технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіоелектронних систем за фактичним станом).
2. Kostanovskyi V., Machalin I., Kozachuk O., Terentyeva I. Construction of a generalized probabilistic – physical model of reliability of two-level active a phased antenna array. *Eastern – Europe an journal of enterprise technologies*. - 2019. 3/9 (99). P. 31-40. [http://doi/10.15587/1729 - 4061.2018.168523](http://doi/10.15587/1729-4061.2018.168523) (Особовий внесок – брала участь у розробленні математичних модель оцінки показників надійності активних фазованих антенних решіток з однорівневою і дворівневою структурною схемою надійності).
3. 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 (Особовий внесок – здобувачкою був виконаний аналіз відмов електрорадіоелементів).
4. Костановський В.В., Козачук О.Д. Математичні моделі прогнозування показників безвідмовності та довговічності електрорадіовиробів на основі статистичних даних про відмови. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем. НАН України «Математичні машини і системи»*. 2015. №2. С. 157-169 (Особовий внесок – брала участь у розробленні математичної моделі прогнозування показників

- безвідмовності електрорадіовиробів на основі статистичних даних про відмови).
5. Костановский В.В., Козачук О.Д. Вероятностный анализ безотказности и долговечности апертур фазированных антенных решеток в процес се проектирования. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем, НАН України «Математичні машини і системи»*. 2015. №3. С. 201-212. (Особовий внесок – здобувачкою була розроблена математична модель надійності АФАР з однорівневою структурною схемою надійності).
  6. Костановский В.В., Козачук О.Д. Оптимизация технического обслуживания группы фазированных антенных решеток с учетом внезапных и постепенных отказов СВЧ каналов. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем, НАН України «Математичні машини і системи»*. 2017. № 1. С. 122 – 130. (Особовий внесок – брала участь у розробленні програмного забезпечення для реалізації моделі оптимізації ТО групи з декількох АФАР антенного поста).
  7. 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. (Особовий внесок – розроблення моделі апроксимації інтенсивності відмов виробів електронної техніки).
  8. 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. (Особовий внесок – розроблення програмного забезпечення розрахунку показників надійності АФАР).
  9. Костановський В.В., Козачук О.Д., Мачалін І.О. Математична модель надійності приймально-передавальної АФАР у приймальному режимі за критерієм допустимого погіршення рівня бокових пелюсток. *Науковий*



- журнал «Наукоємні технології» НАУ. 2020. №3. С. 276-286. (Особовий внесок – брала участь у розробленні програмного забезпечення розрахунку показників надійності АФАР).*
10. Костановський В.В., Мачалін І.О., Козачук О.Д. Взаємозв'язок стратегій експлуатації та технічного обслуговування активних фазованих антенних решіток радіолокаційних станцій. *Науковий журнал «Радіотехніка». 2020. №4. (Особовий внесок – побудувала структурну схему взаємозв'язку стратегій експлуатації та технічного обслуговування).*
11. Козачук О.Д., Костановський В.В., Мачалін І.О., Терентьєва І. Є. Розробка методу та визначення вимог до показників надійності каналів і модулів активної фазованої антенної решітки. *Науковий журнал «Наукоємні технології» НАУ. 2020. №4 (48). С. 439-442. (Особовий внесок – розробка методу визначення вимог до показників надійності каналів і модулів активної фазованої антенної решітки).*
12. Козачук О.Д. Дослідження впливу коефіцієнта надмірності на показники надійності резервованих систем з дробовою кратністю. *Науковий журнал Інституту проблем математичних машин і систем, НАН України «Математичні машини і системи». 2015 р. №1. С. 171-177.*

Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня:

1. *Науково-технічна конференція «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» (Київ, 16-17 грудня 2010 року, форма участі – публікація тез) (Особовий внесок – виконаний аналіз показників сучасної елементної бази);*
2. *Науково-технічна конференція «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки». (Київ, 16-17 грудня 2010 року, форма участі – публікація тез) (Особовий внесок – виконаний аналіз показників сучасної елементної бази);*

3. *II наукова конференція «Проблеми експлуатації і розвитку ракетно-артилерійського озброєння військово-морських сил України»* (Севастополь, 5-7 жовтня 2011 року, форма участі – публікація тез) (Особовий внесок – розроблено програмне забезпечення для оцінки середнього та залишкового ресурсу систем);
4. *XII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи»* (Київ, 23-24 квітня 2013 р. форма участі – публікація тез) (Особовий внесок – проведено аналіз методів розрахунку надійності оптоелектронної елементної бази);
5. *Міжнародна наукова конференція «Статистичні методи обробки сигналів і даних»* (Київ, 16-17 жовтня 2013 року, форма участі – публікація тез) (Особовий внесок – виконано аналіз показників сучасної закордонної елементної бази);
6. *Всеукр. наук.-практ. конф., «Проблеми навігації і управління рухом»* (Київ, 18-20 листопада 2013 р., форма участі – публікація тез);
7. *Наук.-техн. конф., «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM»* (Київ, 17-19 листопада 2014 р., форма участі – публікація тез).

## ДОДАТОК Б

### Акти впровадження

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Перший заступник директора  
ДП «НДІ «КВАНТ»  
з наукової роботи,  
канд. техн. наук



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, начальник науково-дослідного сектору відділу надійності та стандартизації (НДВНС) ДП «НДІ «КВАНТ» О.Д. Козачук склали дійсний акт у тому, що начальник сектору НДВНС О.Д. Козачук приймала участь у «Концептуальному проекті багатофункціональної станції супроводження і наведення (МССН) ЗРК» та виконані нею 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 сектору НДВНС  
ДП «НДІ «КВАНТ»  
О.Д. Козачук 

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, начальник сектору науково-дослідного відділу надійності та стандартизації (НДВНС) ДП «НДІ «КВАНТ» О.Д. Козачук склали дійсний акт у тому, що начальник сектору НДВНС О.Д. Козачук приймала участь у розробці Ескізного проекту «Передвижного радіолокационного поста (ПРП) многофункциональной станции сопровождения и наведения (МССН) ЗРК», шифр «Атлант» та виконані нею дослідження, методики та програмне забезпечення використовувалися:

- у «Передвижном радиолокационном посту МССН ЗРК МД» (малой дальности)), шифр «Атлант-М»; десятичный номер ZRS KRL ANL 001 06, Замовник «КБ «Южное»;


- у «Передвижном радиолокационном посту МССН ЗРК СД» (средней дальности)); шифр «Атлант-С»; десятичный номер ZRS KRL ANL 001 07, Замовник «КБ «Южное».

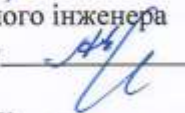
Впроваджені наукові результати та досягнутий фактичний ефект представлені в таблиці.


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 





### 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, начальник науково-дослідного сектору відділу надійності та стандартизації (НДВНС) Козачук О.Д. склали дійсний акт у тому, що начальник сектору НДВНС О.Д. Козачук приймала участь у ДКР «Простір-Ф» та виконані нею дослідження, методики та програмне забезпечення використовувались:

- у «Технічному проєкті 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  2. Програмне забезпечення розрахунку показників надійності фазованих антенних решіток РЛС	Підтвердження характеристик системи вимогам Технічного завдання

**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 сектору НДВНС  
ДП «НДІ «КВАНТ»,  
О.Д. Козачук