

DOI: 10.18372/2310-5461.45.14577

УДК 623.6-523.8:623.4.017 (045)

В. В. Костановський, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
ДК «Укроборонпром» ДП «НДІ «Квант»
orcid.org/0000-0002-3766-4455
e-mail: reliability100@i.ua;

І. О. Мачалін, д-р техн. наук, проф.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-1684-4980
e-mail: tks@nau.edu.ua;

О. В. Демченко, канд. техн. наук
ДК «Укроборонпром» ДП «НДІ «Квант»
orcid.org/0000-0002-8529-4962
e-mail: alexdem@i.ua;

О. Д. Козачук, аспірант
ДК «Укроборонпром» ДП «НДІ «Квант»
orcid.org/0000-0003-0905-1093
e-mail: kozaichyk@gmail.com

МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ АФАР ЗА КРИТЕРІЄМ ДОПУСТИМОГО ЗНИЖЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ДАЛЬНОСТІ РЛС

Вступ

Радіолокаційні станції (РЛС) є основним інформаційним джерелом, що застосовують в системах озброєння і військової техніки (ОВТ) різного призначення.

Ці засоби широко використовуються для ведення наземної (надводної) і повітряної розвідки, контролю космічного простору, попередження про ракетно-ядерний удар і видачі необхідних цілевказань по повітряних, наземних і надводних цілях різних засобів ураження.

Прогнозується створення нових РЛС з активних фазованих антенних решіток (АФАР) відповідно до відкритої архітектури, що забезпечує реалізацію еволюційного розвитку і модульність конструкції, взаємозамінність компонентів, в тому числі вироблених різними фірмами, а також перехід до програмно-апаратної реалізації основних пристроїв (вузлів) [1, с. 37].

Сучасні РЛС космічного базування застосовуються для отримання зображень стратегічних, оперативно-тактичних і тактичних об'єктів, зразків ОВТ, спостереження за повсякденною діяльністю збройних сил, підприємств оборонної промисловості та випробувальних полігонів зарубіжних країн, за розвитком збройних

конфліктів. Дані станції будуть удосконалюватися у напрямку використання нових видів широкосмугових сигналів зі складною структурою і розгортання на орбіті великогабаритних АФАР, довжиною до 300 м, (у даний час 9 м), які забезпечують більш широкі можливості (дозвіл 0,1–0,3 м у смузі 50–100 км) по веденню цілодобової і всепогодної, видової розвідки. Перспективні бортові радіолокаційні станції зможуть працювати в режимах виявлення і супроводу повітряних і наземних цілей, здійснювати картографію земної поверхні, а також вирішувати допоміжні завдання, включаючи проходження рельєфу місцевості [1, с. 37].

Постановка проблеми

Однією з основних проблем під час проектування РЛС з АФАР є забезпечення її високої надійності в процесі експлуатації. Для вирішення цієї проблеми необхідна розробка сучасних математичних моделей надійності АФАР, які враховують архітектуру побудови і фізичні процеси функціонування АФАР.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розробці методів розрахунку надійності АФАР присвячені праці [2–10]. У працях проф. А. К. Агравала [2–4] розглядається розрахунок

надійності АФАР за критерієм допустимого підвищення рівня бічних пелюсток. У праці [2, с. 1205] досліджується надійність АФАР, представленої матрицею на 8000 елементів зі значенням амплітуди головної бічної пелюстки розподілу Тейлора, рівному мінус 40 дБ і гексагональною структурою розміщення випромінювачів, відстань за елементами якої становить половину довжини хвилі. Відмовою АФАР за цим вважається підвищення мінімального рівня ближніх бічних пелюсток амплітудно-фазового розподілу вище максимально допустимого рівня. Відмова АФАР настає під час перевищення граничнодопустимої кількості відмов будь-якого з трьох типів компонентів антени: приймально-передавальних модулів ($N_{T/R} = 8000$), керування ($N_{CM} = 1000$) та джерел живлення ($N_{PS} = 1000$).

У статті [2, с. 1205] представлені значення граничнодопустимої кількості відмов компонентів АФАР під час підвищення рівня бокових пелюсток на 3 дБ:

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

та під час підвищення рівня бокових пелюсток на 6 дБ:

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

Граничні кількості відмов приймально-передавальних модулів — $F_{T/R}$, модулів керування — F_{CM} та джерел живлення — F_{PS} у статті [2, с. 1206] визначались методом статистичного моделювання рівня бокових пелюсток АФАР.

У статті [2, с. 1205] представлена формула для визначення середнього наробітку на відмову АФАР ($MTBF_{ANT}$):

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

де:

$$MTBF_{T/R} = 200\,000 \text{ год};$$

$$MTBF_{CM} = 100\,000 \text{ год};$$

$$MTBF_{PS} = 50\,000 \text{ год};$$

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

За формулою (1) можна вивести формулу для інтенсивностей відмов АФАР, яка буде мати більш простий вигляд:

$$\lambda_{ANT} = \lambda_{T/R} + \lambda_{CM} + \lambda_{PS}, \quad (2)$$

де

$$\lambda_{T/R} = \frac{N_{T/R}}{F_{T/R} * MTBF_{T/R}};$$

$$\lambda_{CM} = \frac{N_{CM}}{F_{CM} * MTBF_{CM}};$$

$$\lambda_{PS} = \frac{N_{PS}}{F_{PS} * MTBF_{PS}};$$

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

$$\lambda_{CM} = 0,002 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_{PS} = 0,004 \text{ год}^{-1};$$

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

Вигляд формули (2) дозволяє зробити висновок, що надійність АФАР у праці [2, с. 1205–1206] описується експоненціальним розподілом імовірності відмов.

У працях [5–7] розглядаються моделі надійності АФАР (на рівні підрешітки або решітки в цілому) за критерієм допустимого зниження випромінюваної потужності. У працях [8; 9; 10] розглядаються більш складні моделі надійності за двома критеріями: за критерієм допустимого зниження випромінюваної потужності (зменшення кількості активних випромінюваних елементів) — для розрахунку надійності передавальної АФАР і за критерієм допустимого підвищення рівня бокових пелюсток — для розрахунку надійності приймальної АФАР. Однак запропоновані в працях [5–7] методи оцінки надійності недостатньо повно ураховують фізичні процеси прийому і передачі СВЧ сигналів в АФАР, оскільки використовують критерій допустимого зниження випромінюваної потужності, який є окремим по відношенню до більш загального критерію зниження максимальної дальності радіолокатора. Тому є актуальною і доцільною розробка моделі надійності АФАР з використанням формули радіолокації, яка враховує зниження максимальної дальності радіолокатора.

Постановка завдання (мета)

Метою даної статті є розробка моделі розрахунку показників надійності АФАР за критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС

Визначення показників моделі надійності АФАР за критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС

Класичне рівняння дальності радіолокації (рівняння радіолокації) у простій і наочній формі пов'язують між собою максимальну дальність дії радіолокатора, його параметри, а також параметри цілі [11, с. 17]:

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

де $P_{\text{пер}}$ — потужність, що випромінюється АФАР (випромінюваної потужності); $P_{\text{пр. min}}$ — найменша приймальна потужність (чутливість приймача); $\sigma_{\text{эф}}$ — ефективна поверхня розсіювання (приймається рівною 1 м^2); λ — довжина хвилі; $G_{\text{пер}}$ — коефіцієнт посилення передавальної антени; $G_{\text{пр}}$ — коефіцієнт посилення приймальної антени.

Рівняння радіолокації (3) може використовуватися для оцінки тактико-технічних характеристик радіолокатора [11, с. 16–17].

Оскільки умова зниження максимальної дальності дії на допустиму величину є основним критерієм відмови РЛС з АФАР, то можна вивести аналітичний вираз (формулу) для визначення показника надійності (середнього наробітку до відмови) АФАР. Характеристики ефективності АФАР: $\sigma_{\text{эф}}$, λ , $P_{\text{пр. min}}$ є незмінними в процесі роботи, не залежать від часу наробітку РЛС і не залежать від кількості каналів і модулів АФАР, що відмовили. Тому у формулі радіолокації вони є постійною величиною.

За цим рівняння радіолокації (3) може бути представлено у такому вигляді:

$$D = \sqrt[4]{\alpha} \times P_{\text{изл}} \times K_{\text{пер}} \times K_{\text{пр}}. \quad (4)$$

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

$$D^4 = \alpha \times P_{\text{изл}} \times K_{\text{пер}} \times K_{\text{пр}}. \quad (5)$$

Під час зниження максимальної дальності РЛС на $\frac{\Delta D}{D}$ рівняння радіолокації матиме вигляд:

$$D^4 \times \left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 = \alpha \times P_{\text{изл}} \times \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{изл}}}{P_{\text{изл}}}\right) \times K_{\text{пер}} \times \left(1 - \frac{\Delta K_{\text{пер}}}{K_{\text{пер}}}\right) \times K_{\text{пр}} \times \left(1 - \frac{\Delta K_{\text{пр}}}{K_{\text{пр}}}\right). \quad (6)$$

Після скорочення лівої і правої частин рівняння на D^4 рівняння радіолокації (6) набуває такого вигляду:

$$\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 = \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{изл}}}{P_{\text{изл}}}\right) \times \left(1 - \frac{\Delta K_{\text{пер}}}{K_{\text{пер}}}\right) \times \left(1 - \frac{\Delta K_{\text{пр}}}{K_{\text{пр}}}\right). \quad (7)$$

Зниження випромінюваної потужності $\frac{\Delta P_{\text{изл}}}{P_{\text{изл}}}$

та зменшення коефіцієнтів посилення передавальної антени $\frac{\Delta K_{\text{пер}}}{K_{\text{пер}}}$ і приймальної антени

$\frac{\Delta K_{\text{пр}}}{K_{\text{пр}}}$ визначається відмовами передавального

$\Delta n_{\text{пер. AM}}$ та приймального $\Delta n_{\text{пр. AM}}$ каналів антенних приймально-передавальних модулів, передавального $\Delta n_{\text{пер. МП}}$ і приймального $\Delta n_{\text{пр. МП}}$ каналів приймально-передавальних модулів підreshітки і відмовами модулів вторинного електроживлення Δn_{ME} :

$$\frac{\Delta P_{\text{изл}}}{P_{\text{изл}}} = \frac{\Delta n_{\text{пер. AM}}}{n_{\text{пер. AM}}} + \frac{\Delta n_{\text{ME}}}{n_{\text{ME}}} + \frac{\Delta n_{\text{пер. МП}}}{n_{\text{пер. МП}}}; \quad (8)$$

$$\frac{\Delta K_{\text{пер}}}{K_{\text{пер}}} = \frac{\Delta n_{\text{пер. AM}}}{n_{\text{пер. AM}}} + \frac{\Delta n_{\text{ME}}}{n_{\text{ME}}} + \frac{\Delta n_{\text{пер. МП}}}{n_{\text{пер. МП}}}; \quad (9)$$

$$\frac{\Delta K_{\text{пр}}}{K_{\text{пр}}} = \frac{\Delta n_{\text{пр. AM}}}{n_{\text{пр. AM}}} + \frac{\Delta n_{\text{ME}}}{n_{\text{ME}}} + \frac{\Delta n_{\text{пр. МП}}}{n_{\text{пр. МП}}}. \quad (10)$$

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

$$\frac{\Delta n_{\text{пер. AM}}}{n_{\text{пер. AM}}} = 1 - P_{\text{пер. AM}}(T_{0_ \text{АФАР}}); \quad (11)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пер. МП}}}{n_{\text{пер. МП}}} = 1 - P_{\text{пер. МП}}(T_{0_ \text{АФАР}}); \quad (12)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{ME}}}{n_{\text{ME}}} = 1 - P_{\text{ME}}(T_{0_ \text{АФАР}}); \quad (13)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр. AM}}}{n_{\text{пр. AM}}} = 1 - P_{\text{пр. AM}}(T_{0_ \text{АФАР}}); \quad (14)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр. МП}}}{n_{\text{пр. МП}}} = 1 - P_{\text{пр. МП}}(T_{0_ \text{АФАР}}). \quad (15)$$

Якщо відмови каналів і модулів є раптовими, то для їх опису використовується експоненціальний розподіл. За цим формули (9)–(13) набувають такого вигляду:

$$\frac{\Delta n_{\text{пер. AM}}}{n_{\text{пер. AM}}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{пер. AM}} \times T_{0_ \text{АФАР}}); \quad (16)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пер. МП}}}{n_{\text{пер. МП}}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{пер. МП}} \times T_{0_ \text{АФАР}}); \quad (17)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{ME}}}{n_{\text{ME}}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{ME}} \times T_{0_ \text{АФАР}}); \quad (18)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.АМ}}}{n_{\text{пр.АМ}}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{пер.АМ}} \times T_{0_АФАР}); \quad (19)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.МП}}}{n_{\text{пр.МП}}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{пер.МП}} \times T_{0_АФАР}) \quad (20)$$

З цього рівняння радіолокатора матиме вигляд:

$$\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 = 9 - 2 \exp(-\lambda_{\text{пер.АМ}} \times T_{0_АФАР}) - 2 \exp(-\lambda_{\text{пер.МП}} \times T_{0_АФАР}) - 3 \exp(-\lambda_{\text{МЕ}} \times T_{0_АФАР}) - \exp(-\lambda_{\text{пр.АМ}} \times T_{0_АФАР}) - \exp(-\lambda_{\text{пр.МП}} \times T_{0_АФАР}). \quad (21)$$

Рівняння (21) містить неявну залежність середнього наробітку до відмови АФАР — $T_{0_АФАР}$ від допустимого зниження максимальної

дальности РЛС с АФАР — $\frac{\Delta D}{D}$. Вирішуючи

наближено трансцендентне рівняння (21) щодо середнього наробітку до відмови можна визначити розрахункове значення $T_{0_АФАР}$ з

будь-якої заданою точністю. Однак для інженерів і дослідників для проведення аналізу надійності АФАР представляє більший інтерес

аналітична залежність $T_{0_АФАР}$ від $\frac{\Delta D}{D}$ у явному вигляді. Така залежність може бути визначена

тільки як наближена під час використання розкладання експоненти в ряд Тейлора:

$$\exp(-\lambda_{\text{пер.АМ}} \times T_{0_АФАР}) = 1 - \lambda_{\text{пер.АМ}} \times T_{0_АФАР} + 0,50(\lambda_{\text{пер.АМ}} \times T_{0_АФАР})^2 - \dots \quad (22)$$

і використання далі перших двох членів ряду, тоді формули (16)–(20) спрощуються:

$$\frac{\Delta n_{\text{пер.АМ}}}{n_{\text{пер.АМ}}} = T_{0_АФАР} \lambda_{\text{пер.АМ}}; \quad (23)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пер.МП}}}{n_{\text{пер.МП}}} = T_{0_АФАР} \lambda_{\text{пер.МП}}; \quad (24)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{МЕ}}}{n_{\text{МЕ}}} = T_{0_АФАР} \lambda_{\text{МЕ}}; \quad (25)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.АМ}}}{n_{\text{пр.АМ}}} = T_{0_АФАР} \lambda_{\text{пр.АМ}}; \quad (26)$$

$$\frac{\Delta n_{\text{пр.МП}}}{n_{\text{пр.МП}}} = T_{0_АФАР} \lambda_{\text{пр.МП}}. \quad (27)$$

Підставляючи аналітичні вирази з формул (23)–(27) в формули (8)–(10) отримаємо такі наближені формули, що описують зниження випромінюваної потужності $\frac{\Delta P_{\text{изл}}}{P_{\text{изл}}}$ і зменшення

коефіцієнтів посилення на передачу $\frac{\Delta K_{\text{пер}}}{K_{\text{пер}}}$ і на

прийом $\frac{\Delta K_{\text{пр}}}{K_{\text{пр}}}$:

$$\frac{\Delta P_{\text{изл}}}{P_{\text{изл}}} \approx (\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) T_{0_АФАР}; \quad (28)$$

$$\frac{\Delta K_{\text{пер}}}{K_{\text{пер}}} \approx (\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{МЕ}}) T_{0_АФАР}; \quad (29)$$

$$\frac{\Delta K_{\text{пр}}}{K_{\text{пр}}} \approx (\lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) T_{0_АФАР}. \quad (30)$$

Підставляючи вирази (28)–(30) в рівняння радіолокації (7), після чого воно стає наближеним і має такий вигляд:

$$\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)^4 \approx [1 - (\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) T_{0_АФАР}]^2 \times [1 - (\lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) T_{0_АФАР}]. \quad (31)$$

При використанні перших двох членів розкладання експоненти в ряд рівняння (31) можна записати в такий спосіб:

$$\left[1 - \frac{\Delta D}{D}\right]^4 \approx \exp[-2(\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) T_{0_АФАР}] \times \exp[-(\lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) T_{0_АФАР}]. \quad (32)$$

Прологарифмувавши рівняння (32) отримаємо для нього більш простий вираз щодо $T_{0_АФАР}$:

$$-4 \ln \left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right) = [2(\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) + (\lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}})] T_{0_АФАР}. \quad (33)$$

З наближеного рівняння (33) можна вивести наближену формулу для визначення середнього наробітку до відмови АФАР $T_{0_АФАР}$ у вигляді:

$$T_{0_АФАР} \approx \frac{4 \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta D}{D}}\right)}{2(\lambda_{\text{пер.АМ}} + \lambda_{\text{пер.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}) + \lambda_{\text{пр.АМ}} + \lambda_{\text{пр.МП}} + \lambda_{\text{МЕ}}}. \quad (34)$$

і наближену формулу для визначення інтенсивності відмов АФАР:

$$\lambda_{0_АФАР} \approx \frac{2(\lambda_{пер.АМ} + \lambda_{пер.МП} + \lambda_{МЕ}) + \lambda_{пр.АМ} + \lambda_{пр.МП} + \lambda_{МЕ}}{4 \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)}} \quad (35)$$

Наближена формула (35) після перетворення має такий вигляд:

$$\lambda_{0_АФАР} \approx \frac{2\lambda_{пер.АМ} + 2\lambda_{пер.МП} + 3\lambda_{МЕ} + \lambda_{пр.АМ} + \lambda_{пр.МП}}{4 \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)}} \quad (36)$$

Використання наближених значень середнього наробітку до відмови АФАР, обчислених за формулою (36) призводить до 1% – 5% похибок порівняннї з точними значеннями, визначеними при вирішенні трансцендентного рівняння (21) за значеннями зниження максимальної дальності радіолокатора: $\frac{\Delta D}{D} \leq 0,10$ і значеннях інтенсивностей відмов каналів і модулів АФАР:

$$\lambda_{пер.АМ}, \lambda_{пер.МП}, \lambda_{МЕ} \leq 10 \times 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Формула (36) дозволяє оцінити внесок інтенсивностей відмов кожного з чотирьох видів каналів і модуля вторинного електроживлення на інтенсивність відмов АФАР у цілому.

Приклад визначення показників надійності АФАР багатофункціональної РЛС:

Початкові дані:

Кількість випромінюючих передавальних і приймальних каналів в АФАР:

$N = 6400$ каналів; кількість підрешіток: $S = 100$ шт.

Допустиме зниження максимальної дальності радіолокатора:

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

Інтенсивності відмов:

$$\lambda_{пер.АМ} = (0,000001 \div 0,000010) \text{ год}^{-1}.$$

$$\lambda_{пер.МП} = 0,000001 \text{ год}^{-1}.$$

$$\lambda_{МЕ} = (0,000001 \div 0,000010) \text{ год}^{-1}.$$

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

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

На рис. 1–3 показані графіки залежності середнього наробітку до відмови АФАР.

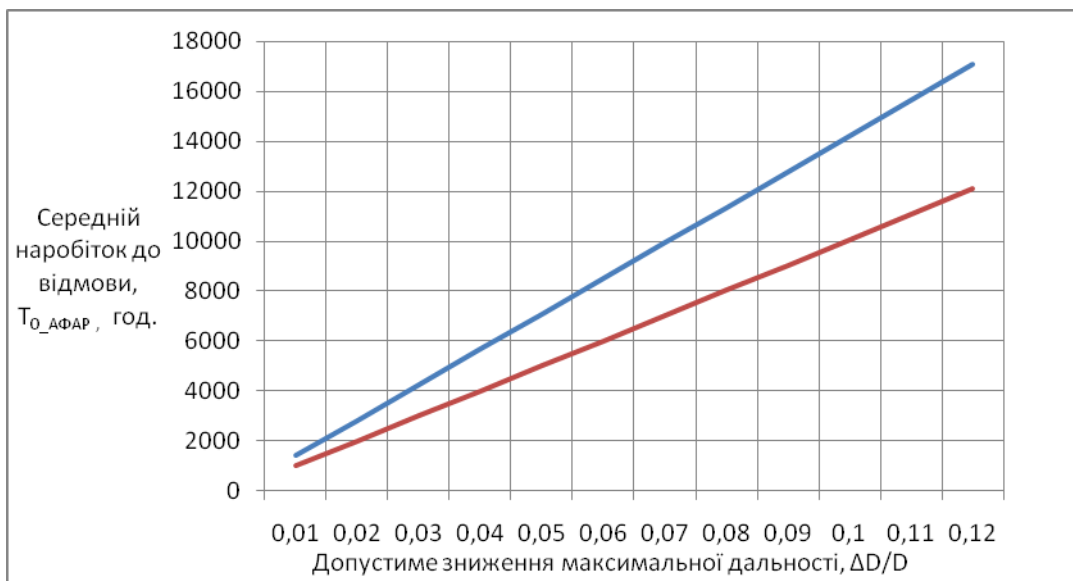


Рис. 1. Графіки залежності середнього наробітку до відмови від допустимого рівня зниження максимальної дальності РЛС з АФАР, за такими інтенсивностями відмов каналів і модулів:

$$\lambda_{пер.МП} = 0,000\ 001 \text{ год}^{-1}; \lambda_{пер.АМ} = 0,000\ 007 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_{пер.МП} = 0,000\ 001 \text{ год}^{-1}; \lambda_{пер.АМ} = 0,000\ 001 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_{МЕ} = 0,000\ 004 \text{ год}^{-1} \text{ — синя лінія}; \lambda_{МЕ} = 0,000\ 008 \text{ год}^{-1} \text{ — червона лінія}$$

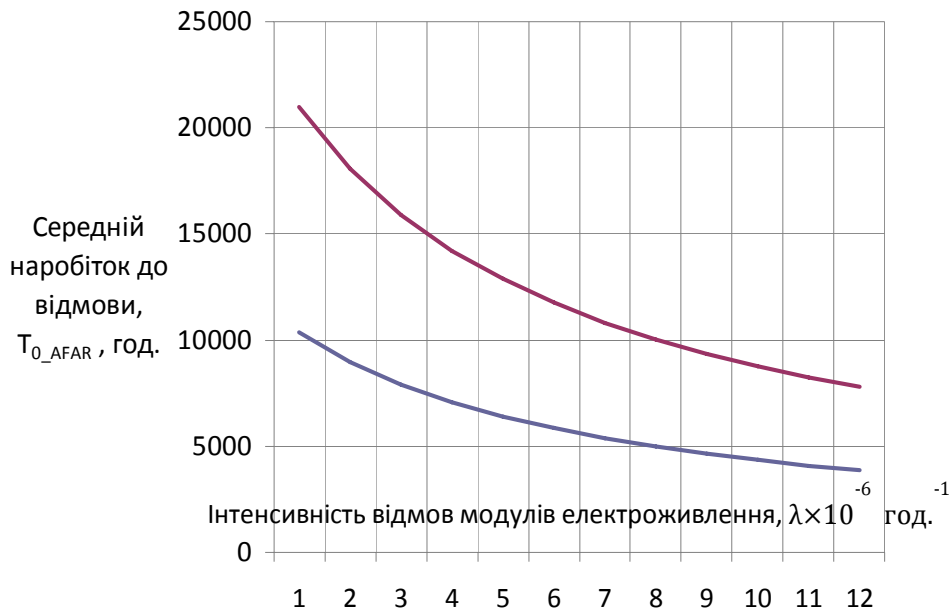


Рис. 2. Графіки залежності середнього наробітку до відмови АФАР РЛС від інтенсивностей відмов модулів вторинного електроживлення для наступних інтенсивностей відмов каналів і модулів:

$$\lambda_{\text{пр.МП}} = 0,000\,001 \text{ год}^{-1}; \lambda_{\text{пер.АМ}} = 0,000\,007 \text{ год}^{-1}; \lambda_{\text{пер.МП}} = 0,000\,001 \text{ год}^{-1};$$

$\lambda_{\text{пр.АМ}} = 0,000\,001 \text{ год}^{-1}$ за допустимим зниженням максимальної дальності:

$$\frac{\Delta D}{D} = 0,10 \text{ – червона_лінія, } \frac{\Delta D}{D} = 0,10 \text{ – синя_лінія}$$

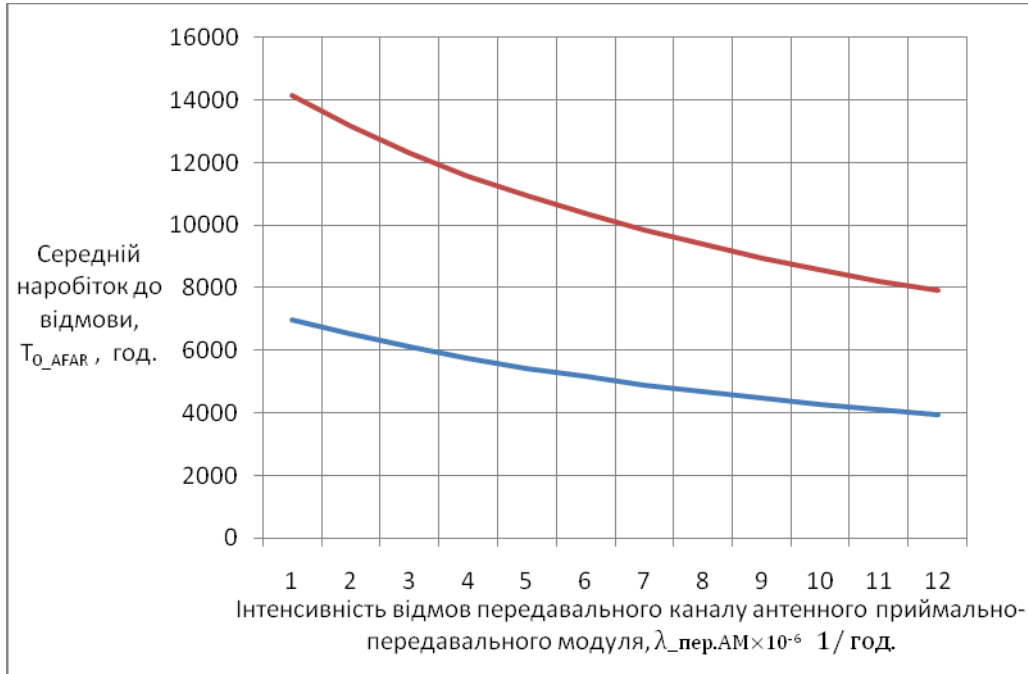


Рис. 3. Графіки залежності середнього наробітку до відмови АФАР РЛС від інтенсивності відмов передавальних (випромінюючих) каналів антенних приймально-передавальних модулів для наступних інтенсивностей відмов каналів і модулів:

$$\lambda_{\text{пр.МП}} = 0,000\,001 \text{ год}^{-1}; \lambda_{\text{МЕ}} = 0,000\,010 \text{ год}^{-1}; \lambda_{\text{пер.МП}} = 0,000\,001 \text{ год}^{-1}; \lambda_{\text{пр.АМ}} = 0,000\,001 \text{ год}^{-1}$$

за допустимим зниженням максимальної дальності: $\frac{\Delta D}{D} = 0,10$ – червона_лінія, $\frac{\Delta D}{D} = 0,10$ – синя_лінія

Висновки

Найбільший внесок у формування інтенсивностей відмов АФАР (за однакової кількості інтенсивностей відмов складових каналів і модуля електроживлення) вносять модулі електроживлення (33 %), значно менший внесок вносять передавальні (випромінюючі) канали (22 %) і найменший внесок вносять приймальні канали (11 %).

Надійність АФАР залежить тільки від допустимого значення зниження максимальної дальності РЛС з АФАР і інтенсивності відмов каналів і модулів, які формують АФАР.

Розглянута модель розрахунку надійності АФАР РЛС дозволяє визначити тільки середній наробіток до відмови і наближено - інтенсивність відмов (для експоненціального розподілу).

У зв'язку з тим, що АФАР є надмірною резервованою структурою то щільність розподілу відмов АФАР повинна бути ближче до нормального закону розподілу.

Розглянута у цій роботі модель надійності є подальшим розвитком моделі розрахунку надійності передавальної АФАР за критерієм допустимого зниження випромінюваної потужності.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Крылов Е.** Перспективы развития радиолокационных станций вооружённых сил иностранных государств. *Зарубежное военное обозрение*. 2018. №2. С. 37–40.
2. **Ashok K.** Agrawal and Eric L. Holzman Active Phased Array Design for High Reliability. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*. 1999. Vol. 35. NO. 4. Pp. 1204–1211.
3. **Ashok K.** Agrawal and Eric L. Holzman Beamformer Architectures for Active Phased-Array Radar Antennas. *IEEE Transactions on antennas and propagation*. 1999. Vol. 47. No. 3. Pp. 432–442.

4. **Ashok K.** Agrawal, Bruce A. Kopp, Mark H. Luesse, and Kenneth W. O'Haver Active Phased Array Antenna Development for Modern Shipboard Radar Systems. *Active phased array antenna development johns hopkins apl technical direct*. 2001. Vol. 22. No. 4. Pp. 600–612.

5. **Kostanovskii V. V.** A mathematical model for calculating the reliability of nonreducible phased antenna arrays. *Measurement Techniques*. 2014. T. 57. № 1. Pp. 87–90.

6. **Костановский В. В.,** Козачук О. Д. Вероятностный анализ безотказности и долговечности апертур фазированных антенных решеток в процессе проектирования. *Математичні машини і системи*. 2015 р. №3. С. 201–213.

7. **Костановський В. В.** Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, які враховують раптови та поступові відмови модулів надвисоких частот. *Математичні машини і системи*. 2014. № 2. С. 142–150.

8. 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*. 2019. Vol. 3/9. No. 99. С. 31–40. ISSN 1729-3774. DOI:10.15587/17289-061/2019/168525,

9. **Костановский В. В.** Визначення області існування показників надійності в залежності від допустимих значень показників ефективності і активної фазованої антенної решітки. *Математичні машини і системи*. 2019. № 4. С. 154–164.

10. **Констановський В. В.** Дослідження залежності показників надійності афар рлс від температури активної зони кристала gap транзисторів. *Наукоємні технології*. 2019. Вип. 2. Т. 42. С. 254–261. DOI: 10.18372/2310-5461.42.13759

11. **Пица Д. М.,** Семенов Д. С., Бугрова Т. И. Проектирование радиолокационных систем. / МОН Украины. / Запорожье: Запорожский национальный технический университет, 2017.

Костановський В. В., Мачалін І. О., Демченко В. В., Козачук В. В. МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ АФАР ЗА КРИТЕРІЄМ ДОПУСТИМОГО ЗНИЖЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ДАЛЬНОСТІ РЛС

Метою цієї статті є розробка моделі розрахунку показників надійності АФАР за критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС. Рівняння дальності радіолокації пов'язують між собою максимальну дальність дії радіолокатора і його параметри: потужність, що випромінюється АФАР, коефіцієнт посилення передавальної антени, коефіцієнт посилення приймальної антени. Під час функціонування АФАР поступово відмовляють його активні елементи: передають і прийомні канали приймально-передавальних модулів підешіток і АФАР в цілому, а також модулі вторинного електроживлення. Це призводить до зменшення випромінюваної потужності і зниження коефіцієнтів посилення. Кількість відмов передавальних каналів і модулів електроживлення визначається їх інтенсивностями відмов і загальною кількістю каналів і модулів. Використовуючи формулу радіолокації, а також залежності зниження випромінюваної потужності і коефіцієнтів посилення від кількості передавальних і приймальних каналів АФАР, що відмовили, була визначена аналітична залежність зниження максимальної дальності радіолокатора від середнього наробітку до відмови РЛС. У загальному вигляді (за довільним законом розподілу відмов передавальних, приймальних каналів і модулів електроживлення) ця залежність є трансцендентним рівнянням відносно середнього наробітку до

відмови АФАР. Під час використання експоненціального розподілу відмов і розкладання експоненти в ряд з двох членів трансцендентне рівняння вдалося перетворити в наближену формулу для визначення середнього наробітку до відмови і інтенсивності відмов АФАР. У статті також представлений ілюстративний приклад розрахунку показників надійності: середній наробіток до відмови і інтенсивності відмов в залежності від допустимого зниження максимальної дальності РЛС. Представлені графіки залежності середнього наробітку до відмови від значень допустимого зниження максимальної дальності і інтенсивностей відмов передавальних каналів і модулів електроживлення. Представлені в статті результати рекомендується використовувати для оцінки надійності АФАР в процесі проектування і експлуатації РЛС.

Ключові слова: активна фазована антенна решітка; радіолокаційна станція; середній час наробітку до відмови; інтенсивність відмов.

Kostanovskiy V., Machalin I., Demchenko A., Kozachuk O.

MODEL FOR CALCULATING APAR RELIABILITY INDICATORS BY THE CRITERION OF PERMISSIBLE REDUCTION OF THE MAXIMUM RADAR RANGE

The purpose of this article was to develop a model for calculating APAR reliability indicators by the criterion of an acceptable reduction in the maximum radar range. The radar range equation relates the maximum range of the radar and its parameters: power emitted by the APAR, transmit antenna gain, receive antenna gain. During the operation of the APAR, its active elements gradually fail: the transmitting and receiving channels of the transceiver modules of the sublattices and the AFAR as a whole, as well as the secondary power supply modules. This leads to a decrease in radiated power and a decrease in gain. The number of failures of transmission channels and power supply modules is determined by their failure rates and the total number of channels and modules. Using the formula of radar, as well as the dependence of the decrease in radiated power and amplification factors on the number of failed transmitting and receiving channels of the AFAR, the analytical dependence of reducing the maximum range of the radar from the mean time to failure of the radar was determined. In general form (with an arbitrary law of distribution of failures of transmitting, receiving channels and power supply modules), this dependence is a transcendental equation with respect to the mean time between failures of the AFAR. Using the exponential distribution of failures and expanding the exponent in a series of two terms, the transcendental equation was able to be converted into an approximate formula for determining the mean time between failures and the failure rate of AFAR. The article also presents an illustrative example of calculating reliability indicators: mean time to failure and failure rate, depending on the allowable decrease in the maximum radar range. The graphs of the dependence of the average operating time to failure on the values of the allowable decrease in the maximum range and failure rates of the transmitting channels and power supply modules are presented. The results presented in the article are recommended to be used to assess the reliability of AFAR during the design and operation of radars.

Keywords: active phased array antenna; radar station; mean time between failures; failure rate.

Костановский В. В., Мачалин И. А., Демченко А. В., Козачук О. Д.

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ АФАР ПО КРИТЕРИЮ ДОПУСТИМОГО СНИЖЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ РЛС

Целью данной статьи являлась разработка модели расчета показателей надежности АФАР по критерию допустимого снижения максимальной дальности РЛС. Уравнение дальности радиолокации связывают между собой максимальную дальность действия радиолокатора и его параметры: мощность, излучаемую АФАР, коэффициент усиления передающей антенны, коэффициент усиления приемной антенны. При функционировании АФАР постепенно отказывают его активные элементы: передающие и приемные каналы приемо-передающих модулей подрешеток и АФАР в целом, а также модули вторичного электропитания. Это приводит к уменьшению излучаемой мощности и снижению коэффициентов усиления. Количество отказов передающих каналов и модулей электропитания определяется их интенсивностями отказов и общим количеством каналов и модулей. Используя формулу радиолокации, а также зависимость снижения излучаемой мощности и коэффициентов усиления от количества отказавших передающих и приемных каналов АФАР, была определена аналитическая зависимость снижения максимальной дальности радиолокатора от средней наработки до отказа РЛС. В общем виде (при произвольном законе распределения отказов передающих, приемных каналов и модулей электропитания) данная зависимость представляет собой трансцендентное уравнение относительно средней наработки до отказа АФАР. При использовании экспоненциального распределения отказов и разложения экспоненты в ряд из двух членов трансцендентное уравнение удалось преобразовать в приближенную формулу для определения средней наработки до отказа и интенсивности отказов АФАР. В статье также представлен иллюстрационный пример расчета показателей надежности: средней наработки до отказа и интенсивности отказов в зависимости от допустимого снижения максимальной дальности РЛС. Представлены графики зависимости средней наработки до отказа от значений допустимого снижения максимальной дальности и интенсивностей отказов передающих каналов и модулей электропитания. Представленные в статье результаты рекомендуется использовать для оценки надежности АФАР в процессе проектирования и эксплуатации РЛС.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка; радиолокационная станция; среднее время наработки до отказа; интенсивность отказов.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2020 р.

Прийнято до друку 11.03.2020 р.