

## **ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТІ ІСНУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ДОПУСТИМИХ ЗНАЧЕНЬ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ**

\*Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

**Анотація.** У статті розглядається визначення області можливих значень показників надійності активних фазованих антенних решіток (АФАР) багатофункціональних радіолокаційних станцій (РЛС). У роботі представлена модернізована ймовірнісно-фізична модель надійності АФАР у вигляді системи обмежень на значення показників ефективності антенної решітки: відносної потужності випромінювання і мінімального рівня ближніх бічних пелюстків амплітудно-фазового розподілу діаграми спрямованості АФАР. Показано, що у процесі експлуатації значення показників ефективності АФАР можуть перебувати в області працездатних або в області непрацездатних станів, які в цілому можна представити у вигляді  $m_G$ ,  $m_S$  матриці. У статті запропоновано структурну схему надійності АФАР у вигляді трирівневої ієрархічної структури. Автором уточнені критерії відмов і представлені два нових визначення відмов АФАР. А також уточнено формули і рівняння для обчислення середнього наробітку до відмови та ймовірності безвідмовної роботи антенної фазованої решітки і АФАР у цілому. Застосування модернізованої ймовірнісно-фізичної моделі надійності АФАР ілюструється прикладом розрахунку гіпотетичної АФАР, що має 6400 ППК скомпонованих у 100 антенних підрешіток. Результати розрахунків показників надійності представлені у вигляді графіків і матриці станів АФАР розміром  $10 \times 15$ . За результатами розгляду результатів розрахунку елементів матриці визначені області працездатних станів і області непрацездатних станів АФАР. Запропонована у статті модернізована ймовірнісно-фізична модель надійності АФАР може бути корисна під час проектування і експлуатації багатофункціональних РЛС.

**Ключові слова:** антенна фазована решітка, приймально-передавальний канал, приймальний канал, антенна підрешітка, випромінювальна потужність, мінімальний рівень ближніх бічних пелюсток.

**Аннотация.** В статье рассматривается определение области возможных значений показателей надежности активных фазированных антенных решеток (АФАР) многофункциональных радиолокационных станций (РЛС). В работе представлена модернизированная вероятностно-физическая модель надежности АФАР в виде системы ограничений на значения показателей эффективности антенной решетки: относительной мощности излучения и минимального уровня ближних боковых лепестков амплитудно-фазового распределения диаграммы направленности АФАР. Показано, что в процессе эксплуатации значения показателей эффективности АФАР могут находиться в области работоспособных или в области неработоспособных состояний, которые в целом можно представить в виде  $m_G$ ,  $m_S$  матрицы. В работе предложена структурная схема надежности АФАР в виде трехуровневой иерархической структуры. Автором уточнены критерии отказов и представлены два новых определения отказов АФАР. Уточнены формулы и уравнения для вычисления средней наработки до отказа и вероятности безотказной работы антенной фазированной подрешетки и АФАР в целом. Применение модернизированной вероятностно-физической модели надежности АФАР иллюстрируется примером расчета гипотетической АФАР, имеющей 6400 ППК, скомпонованных в 100 антенных подрешеток. Предполагается, что отказы ППК, приемных модулей и вторичных источников питания распределены по экспоненциальному закону. Результаты расчетов показателей надежности представлены в виде рисунков и матрицы состояний АФАР размером  $10 \times 15$ . По результатам рассмотрения расчета элементов матрицы определены области работоспособных состояний и области неработоспособных состояний АФАР. Предлагаемая в статье модернизированная вероятностно-физическая модель надежности АФАР может быть полезна при проектировании и эксплуатации многофункциональных РЛС.

**Ключевые слова:** антенная фазированная решетка, приемо-передающий канал, приемный канал, антенная подрешетка, излучаемая мощность.

**Abstract.** The paper considers the determination of the range of possible values of the reliability indicators of active phased array antennas (APAA) of multifunctional radars. The modernized probabilistic-physical model of the APAA reliability is presented in the form of a system of restrictions on the values of the antenna array efficiency indicators: the relative radiation power and the minimum level of the near side lobes of the amplitude-phase distribution of the APAA beam pattern. It is shown that during operation, the values of the APAA efficiency indicators can be in the field of operable or in the field of inoperative states, which in general can be represented as an  $m_G$ ,  $m_S$  matrix. A structural diagram of the APAA reliability in the form of a three-level hierarchical structure is proposed. The author refined the criteria for failures and presented two new definitions of failures of APAA. The formulas and equations for calculating the mean time between failures and the probability of failure-free operation of the phased sublattice antenna and the APAA as a whole have been clarified. The application of the upgraded probabilistic-physical model of the APAA reliability is illustrated by an example of the calculation of a hypothetical APAA having 6400 SCDs arranged in 100 antenna sublattices. It is assumed that failures of the control panel, receiver modules and secondary power supplies are distributed exponentially. The results of calculations of reliability indicators are presented in the form of figures and a matrix of APAA states with a size of  $10 \times 15$ . Based on the results of consideration of the calculation of the matrix elements, the fields of operating conditions and the fields of nonoperable conditions of the APAA are determined. The modernized probabilistic-physical model of the APAA reliability proposed in the paper can be useful in the design and operation of multifunctional radars.

**Keywords:** phased array antenna, transmitting and receiving channel, receiving channel, antenna sublattice, radiated power, minimum near side lobes.

DOI: 10.34121/1028-9763-2019-4-154-164

## 1. Вступ

У світовій практиці широко застосовуються наземні і морські багатофункціональні радіолокаційні станції (РЛС) з активними фазованими антенними решітками (АФАР).

Метою роботи є вдосконалення ймовірно-фізичної моделі надійності АФАР, розробленої автором раніше [9]; уточнення критеріїв відмов антенної фазованої решітки; визначення границь області існування і побудова матриці показників ефективності та надійності АФАР.

## 2. Постановка проблеми

Основними характеристиками РЛС з АФАР, які забезпечуються під час проектування разом з характеристиками призначення, є показники надійності. Тому актуальною є розробка математичних моделей надійності та інженерних методів розрахунку показників надійності АФАР під час проектування.

## 3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розробці методів розрахунку показників надійності АФАР присвячено безліч наукових праць, починаючи з 1995 р. [1–8]. У [1–6] представлені методи розрахунку середнього наробітку до відмови –  $T_{0\_APAR}$  та ймовірності безвідмовної роботи –  $P_{APAR}(t)$ , які враховують надмірність випромінюючих приймально-передавальних каналів (ППК) в антенній фазованій решітці. У [4–8] домінує поняття відмови АФАР і досліджується надійність різних структур АФАР. У праці [8] запропоновано уявлення структурної схеми надійності АФАР як ієрархічної структури, розглянуто побудову ймовірно-фізичної моделі надійності дворівневої АФАР.

В основі побудови ймовірно-фізичної моделі надійності АФАР [8] лежить залежність допустимої кількості відмов ППК в антенній підрешітці –  $m_G$ , допустимої кількості відмов антенних підрешіток в АФАР –  $m_S$  від номінальних значень показників ефективності (визначаючих параметрів) фазованої антенної решітки: рівня випромінюваної потужно-

сті –  $P_{RAD}/P_{RAD,NOM}$  і мінімального рівня ближніх бічних пелюстків амплітудно-фазового розподілу (АФР) діаграми спрямованості (ДС) антенної решітки –  $F_{\sigma_{min}}$ . АФАР за своїм конструктивним виконанням є системою надлишковою, з певною кількістю надлишкових (квазірезервних) приймально-передавальних каналів (ППК), приймальних модулів (ПМ) і вторинних джерел живлення (ВДЖ). Тому у процесі експлуатації (в міру настання відмов ППК, ПМ і ВДЖ) показники ефективності антенної решітки будуть поступово погіршуватися від номінальних значень до мінімальних. Ураховуючи, що значення показників ефективності АФАР визначаються кількістю допустимих відмов в антенній підрешітці –  $m_G$  і кількістю допустимих відмов приймальних модулів (підрешіток) –  $m_S$ , то для кожної АФАР можна побудувати  $m_G \times m_S$  матрицю  $A_{mG \times mS}$ :

$$A_{mG \times mS} = \begin{pmatrix} 1, 1 & 2, 1 & \dots & m_G - 1, 1 & m_G, 1 \\ 1, 2 & 2, 2 & \dots & m_G - 1, 2 & m_G, 2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1, m_S - 1 & 2, m_S - 1 & \dots & m_G - 1, m_S - 1 & m_G, m_S - 1 \\ 1, m_S & 2, m_S & \dots & m_G - 1, m_S & m_G, m_S \end{pmatrix},$$

кожному елементу якої відповідають значення  $P_{RAD}/P_{RAD,NOM}$ ,  $F_{\sigma_{min}}$  і  $T_{O\_APAR}$ . У розглянутих раніше роботах щодо оцінки надійності [1–8] АФАР розглядається як система, що знаходиться в одному із двох станів (працездатному або непрацездатному), яка характеризується єдиним значенням показника надійності. Такий підхід є одностороннім, так як не дозволяє використовувати всі потенційні можливості АФАР як надлишкової системи. Тому під час проектування і експлуатації АФАР актуальною є проблема визначення показників ефективності та надійності антенної решітки як системи, яка може перебувати у великій кількості працездатних і непрацездатних станів.

#### 4. Рішення завдання

##### 4.1. Уточнення критеріїв відмов і фізичної моделі надійності АФАР

Відповідно до ДСТУ 27.002 [9], під відмовою об'єкта розуміється «подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкта; під критерієм відмови об'єкта розуміється ознака або сукупність ознак порушення працездатного стану об'єкта, встановлених у документації». Відповідно до ДСТУ 2.103 [10], ознаками відмов і граничних станів об'єкта є: «припинення (повне або часткове) виконання об'єктом заданих функцій; відхилення заданих показників якості за межі встановлених норм; відмови і граничні стани складових частин об'єкта, які проводять до припинення (повного або часткового) функціонування об'єкта або виходу його показників якості за встановлені норми; виникнення процесів, що перешкоджають функціонуванню об'єкта; досягнення об'єктом призначеного ресурсу або назначеного терміну служби; техніко-економічні фактори».

Основними показниками ефективності АФАР є: потужність випромінювання –  $P_{RAD}$  і мінімальний рівень (амплітуда) ближніх бічних пелюстків амплітудно-фазового розподілу (АФР) ДН –  $F_{\sigma_{min}}$  [11].

Критерії відмов АФАР визначаються з системи рівнянь, що характеризуються відхиленнями значень показників ефективності за допустимі межі:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_{RAD.MIN.}}{P_{RAD.NOM.}} \times 100\% &= \left[ \frac{P_{RAD.NOM.} - P_{RAD.MIN.}}{P_{RAD.NOM.}} \right] \times 100\%, \\ F_{\sigma_{min}} &\leq [F_{\sigma_{nom.}} - F_{\sigma_{min.}}] \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Система рівнянь (1) представляє уточнену фізичну модель надійності АФАР.

Виходячи із запропонованих вище ДСТУ – їх визначень відмови і ознак відмови [10–11], можна уточнити критерії відмови АФАР для багатофункціональної РЛС. Під критерієм відмови АФАР розуміється:

– зниження випромінюваної потужності в режимі на передачу (випромінювання) більш ніж на  $\frac{P_{RAD.MIN.}}{P_{RAD.NOM.}} \times 100\%$ , що відповідає допустимості відмови певного числа

випромінюючих приймально-передавальних каналів антенної підрешітки (з коефіцієнтом надмірності  $C_1$ );

– підвищення рівня (амплітуди) ближніх бічних пелюстків АФР у приймальному режимі до номінального рівня –  $F_{\sigma_{nom}}$  дБ., що відповідає допустимості відмови деякого числа антенних підрешіток (великих приймальних модулів) в АФАР (з коефіцієнтом надмірності  $C_2$ ).

Допустима кількість відмов (ППК, ПМ і модулів ВДЖ) і коефіцієнти надмірності  $C_1$  і  $C_2$  визначаються фахівцями з електродинаміки і радіолокації за результатами комп'ютерного моделювання АФР АФАР.

#### 4.2. Уточнення математичної моделі надійності АФАР

Структурна схема надійності АФАР багатофункціональної РЛС описується трирівневою ієрархічною структурою. Структурами першого (нижнього) рівня вважаються  $N_0$  приймально-передавальних каналів (ППК), конструктивно оформлених у вигляді  $S_0$  антенних фазованих підрешіток. Кожна з підрешіток включає  $G_0$  ППК, при цьому частина ППК ( $m_G = C_1 G_0$ ) є квазінадлишковими (резервними). Структурами другого (середнього) рівня АФАР є  $S_0$  великих приймальних модулів. Кожен із великих приймальних модулів включає одну антенну підрешітку, один приймальний модуль і модулі ВДЖ. Отже частина великих модулів ( $m_S = C_2 S_0$ ) є квазінадлишковими (резервними). Структурою третього (верхнього) рівня у схемі надійності вважається АФАР у цілому.

Із праці [11] відомо, що для багатофункціональних РЛС з АФАР коефіцієнти надмірності складають:

$C_1 = 10\%–20\%$  (0,10–0,20) – для забезпечення необхідного рівня відносної випромінюваної потужності АФАР;

$C_2 = 5\%–15\%$  (0,05–0,15) – для забезпечення мінімального рівня ближніх бічних пелюстків АФР ДН.

Під час реалізації фізичної моделі надійності (див. систему рівнянь (1)) визначаються допустима кількість відмов ППК (коефіцієнт надмірності  $C_1$ ) в антенних підрешітках і допустима кількість відмов антенних підрешіток в АФАР (коефіцієнт надмірності  $C_2$ ). Математична (імовірнісна) модель надійності АФАР будується на підставі структурної схеми надійності з застосуванням коефіцієнтів надмірності для розрахунку показників надійності.

Для формалізації критеріїв відмов пропонується уточнити два визначення відмов АФАР.

*Визначення 1.* Відмовою антенної підрешітки АФАР вважається зменшення загальної кількості працездатних ППК у підрешітці на одну одиницю менше допустимого рівня, рівного  $G_0(1 - C_1)$ .

Відповідно до визначення 1, кількість працездатних приймально-передавальних каналів у момент відмови антенної підрешітки ( $t = T_{0\_SLAPAR}$ ) розраховується за формулою

$$G(t = T_{0\_SLAPAR}) = G_0(1 - C_1 - \frac{1}{G_0}) = G_0 - m_G - 1, \quad (2)$$

де  $T_{0\_SLAPAR}$  – середній наробіток до відмови фазованої антенної підрешітки,

$$m_G = G_0 C_1. \quad (3)$$

*Визначення 2.* Відмовою АФАР вважається зменшення загальної кількості працездатних великих приймальних модулів на одну одиницю менше допустимого значення, рівного  $S_0(1 - C_2)$ .

Відповідно до визначення 2, кількість працездатних приймальних модулів у момент відмови АФАР ( $t = T_{0\_APAR}$ ) розраховується таким чином:

$$G(t = T_{0\_APAR}) = S_0(1 - C_2 - \frac{1}{S_0}) = S_0 - m_S - 1, \quad (4)$$

де  $T_{0\_APAR}$  – середній наробіток до відмови АФАР,

$$m_S = S_0 C_2. \quad (5)$$

На основі формули (2) виводиться трансцендентне рівняння, рішенням якого є значення середнього наробітку до відмови антенної підрешітки АФАР –  $T_{0\_SLAPAR}$ :

$$P_{CHAN}(T_{0\_SLAPAR}) = 1 - C_1 - \frac{1}{G_0}. \quad (6)$$

На основі формули (4) виводиться трансцендентне рівняння, рішенням якого є значення середнього наробітку до відмови АФАР –  $T_{0\_APAR}$ .

$$P_{RM}(t = T_{0\_APAR})P_{SPS}(T_{0\_APAR})P_{SLAPAR}(T_{0\_APAR}) = 1 - C_2 - \frac{1}{S_0}. \quad (7)$$

Для визначення ймовірності безвідмовної роботи використовується формула для біноміального розподілу:

– для великого приймального модуля:

$$P_{SLAPAR}(t) = P_{RM}(t)P_{SPS}(t) \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [P_{CHAN}(t)]^{G_0-i} [1 - P_{CHAN}(t)]^i; \quad (8)$$

– для АФАР в цілому:

$$P_{APAR}(t) = \sum_{j=0}^{m_S} C_{S_0}^j [P_{SLAPAR}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{SLAPAR}(t)]^j. \quad (9)$$

Після обчислення середнього наробітку до відмови АФАР –  $T_{0\_APAR}$  з рівняння (7) визначається відносна кількість, що відмовили ППК, в АФАР у цілому –  $\Delta N/N_0$  зниження відносної випромінювальної потужності АФАР  $\frac{P_{RAD.MIN.}}{P_{RAD.NOM}}$  – за формулою

$$\frac{P_{RAD.MIN.}}{P_{RAD.NOM}} = \frac{N(T_{0\_APAR})}{N_0} = 1 - P_{CHAN}(T_{0\_APAR})P_{SPS}(T_{0\_APAR}) - \frac{1}{N_0}. \quad (10)$$

Застосовуючи відому формулу радіолокації для дальності виявлення радіолокатора з пасивною відповіддю (залежність дальності РЛС від випромінювальної потужності), можна визначити зниження відносної дальності РЛС:

$$\frac{D(T_{0\_APAR})}{D_{NOM}} = \sqrt[4]{\frac{P_{RAD}(T_{0\_APAR})}{P_{RAD.NOM.}}} = \sqrt[4]{\frac{N(T_{0\_APAR})}{N_0}} = \sqrt[4]{1 - \frac{N(T_{0\_APAR})}{N_0}}. \quad (11)$$

### 4.3. Прогнозування області можливих значень показників надійності АФАР

За своєю конструктивною побудовою АФАР є надлишковою системою, яка за різними значеннями  $m_G$  може перебувати, крім станів відмови, також у безлічі інших працездатних станах. Тому для експлуатації становить значний інтерес прогнозування зміни значень показників надійності під час погіршення її показників ефективності АФАР.

Область існування значень показників ефективності (визначальних параметрів) АФАР розділяється на дві підобласті: підобласть працездатних станів, підобласть непрацездатних станів. У процесі функціонування АФАР її показники ефективності (відносна випромінювальна потужність –  $P_{RAD}/P_{RAD.NOM}$  і мінімальний рівень ближніх бічних пелюстків АФАР –  $F_{\sigma}$ ) є функціями часу і параметрів  $m_G$  і  $m_S$ :

$$P_{RAD.}/P_{RAD.NOM.} = f(m_G, m_S, t) \text{ и } F_{\sigma_{min.}} = Q(m_G, m_S, t).$$

Відповідно, середній наробіток до відмови АФАР також є функцією параметрів  $m_G$  і  $m_S$ .

Таким чином, для діапазона значень параметрів  $\Delta G_i$  і  $\Delta S_j$ :

$$\Delta G_i = 1, 2, \dots, m_G - 1, m_G; \Delta S_j = 1, 2, \dots, m_S - 1, m_S$$

можна побудувати матрицю (1), елементи якої є можливими станами антенної решітки з певними значеннями показників ефективності та середнього наробітку до відмови АФАР. Отже, процесу прогнозування показників надійності АФАР повинен передувати процес визначення границь підобласті допустимих значень показників ефективності АФАР. Розробник, орієнтуючись на допустиме зниження показників ефективності, використовуючи підобласть допустимих значень показників ефективності та матрицю можливих станів АФАР (1), може спрогнозувати для всіх можливих станів антенної решітки значення показників надійності (середнього наробітку до відмови та ймовірність безвідмовної роботи).

## 5. Прогнозування показників надійності реальної структури АФАР багатфункціональної РЛС

1. Розглянемо розрахунок показників надійності гіпотетичної трирівневої АФАР багатфункціональної РЛС з такими характеристиками:

–  $S_0 = 100$  – число антенних підрешіток в АФАР;

- $G_0 = 64$  – число випромінюючих ППК каналів у фазованій антенній решітці;
- $S_0 \times G_0 = 6400$  – загальне число випромінюючих (приймально-передавальних) каналів в АФАР;
- $\lambda_{RAD.CHAN.} = 7 \times 10^{-6} \text{ м}$ ,  $\lambda_{REC.MOD.} = 3 \times 10^{-6} \text{ м}$ ,  $\lambda_{SPS} = 5 \times 10^{-6} \text{ м}$  – відповідно інтенсивності відмов випромінювального приймально-передавального каналу, приймального модуля і модулів вторинних джерел живлення.

Діапазон зміни допустимої кількості відмов ППК –  $m_g$  знаходиться в межах від 1-го до 10-ти. Діапазон зміни допустимих відмов антенних підрешіток –  $m_s$  знаходиться в межах від 1-го до 15-ти.

2. Розмір матриці можливих станів АФАР:  $m_g \times m_s = 10 \times 15$  (див. табл. 1).

Кількість елементів матриці складає 150, кожен  $(i, j)$  елемент матриці характеризується відповідними значеннями мінімального рівня бічних пелюсток АФР –  $G_\sigma(i, j)$ , рівня відносної випромінювальної потужності –  $P_{RAD}(i, j) / P_{RAD.NOM}$ , рівня дальності дії РЛС –  $D/D_{NOM}$  і середнього наробітку до відмови АФАР –  $T_{0\_APAR}$ .

3. Визначаються ймовірності безвідмовної роботи –  $P_{APAR}(t)$  і середній наробіток до відмови АФАР –  $T_{0\_APAR}$ , використовуючи формулу (9) і рішення рівняння (7) при умові допустимості відмови чотирьох ( $m_G = 4$ ) приймально-передавальних каналів антенної решітки для трьох різних значень кількості допустимих відмов підрешіток АФАР:

- припустимо, відмова 1-ої підрешітки ( $m_s = 1$ ) –  $T_{0\_APAR} = 2169$  год;
- допустимо відмову 6-и підрешіток ( $m_s = 6$ ) –  $T_{0\_APAR} = 4204$  год;
- допустимо відмову 10-и підрешіток ( $m_s = 10$ ) –  $T_{0\_APAR} = 5083$  год.

Результати розрахунків показників надійності АФАР представлені на рис. 1–3. З рис. 1 видно, що ймовірність безвідмовної роботи АФАР:

- на інтервалі часу від 0 до 2168 год зменшується від 1,00 до 0,420;
- на інтервалі часу від 2168 год до 2169 год підвищується від 0,420 до 1,00;
- на інтервалі часу від 2169 год до 4203 год зменшується від 1,000 до 0,420;
- на інтервалі часу від 4203 год до 4204 год підвищується від 0,420 до 0,890;
- на інтервалі часу від 4204 год до 5083 год зменшується від 0,890 до 0,420.

З рис. 1 також видно, що:

- на інтервалі часу від 0 до 2169 год забезпечуються значення рівня ближніх бічних пелюстків –  $F_\sigma(4, 1)$  і значення рівня відносної потужності випромінювання –  $P_{RAD}(4, 1) / P_{RAD.NOM} = 0,9745$ ;

- на інтервалі часу від 2169 год до 4204 год забезпечуються значення рівня ближніх бічних пелюстків –  $F_\sigma(4, 6)$  і значення рівня відносної потужності випромінювання –  $P_{RAD}(4, 6) / P_{RAD.NOM} = 0,9509$ ;

- на інтервалі часу від 4204 год до 5083 год забезпечуються значення рівня ближніх бічних пелюстків –  $F_\sigma(10, 6)$  і значення рівня відносної потужності випромінювання –  $P_{RAD}(4, 10) / P_{RAD.NOM} = 0,9410$ .

З рис. 2 видно, що значення середнього наробітку до відмови АФАР у залежності від кількості допустимих відмов у антенній підрешітці  $m_G$  та кількості допустимих відмов підрешіток в АФАР  $m_s$  змінюються від 500 год (за  $m_G = 1$ ,  $m_s = 1$ ) до 15000 год за ( $m_G = 10$ ,  $m_s = 15$ ).

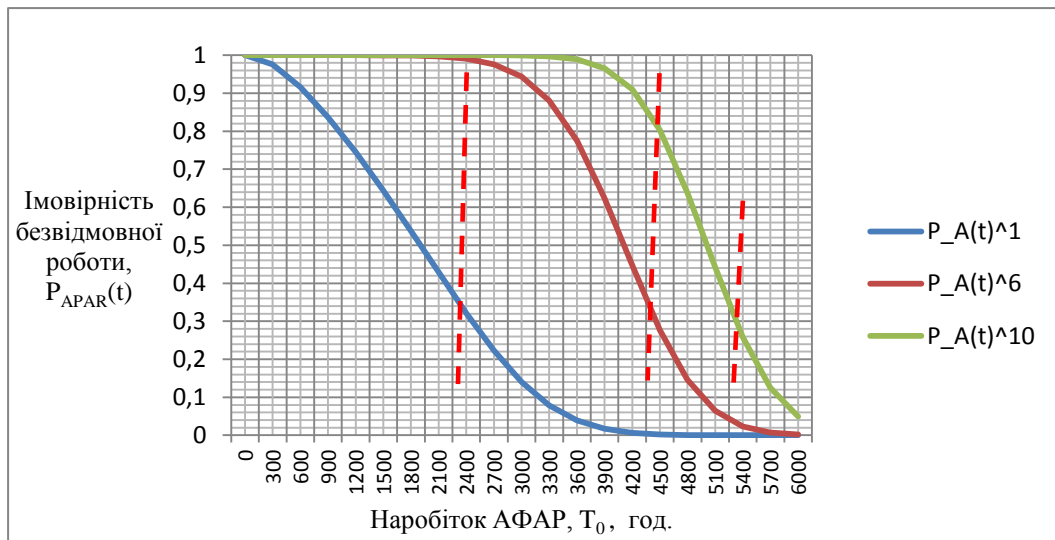


Рисунок 1 – Графіки ймовірності безвідмовної роботи АФАР за різною кількістю допустимих відмов підрешіток АФАР (відмовою підрешітки є відмова –  $m_C = 4$  приймально-передавальних каналів): графік червоного кольору – допустима відмова однієї підрешітки – ( $T_0 = 2169$  год); графік коричневого кольору – допустима відмова 6-ти підрешіток – ( $T_0 = 4204$  год); графік зеленого кольору – допустима відмова 10-ти підрешіток – ( $T_0 = 5083$  год)

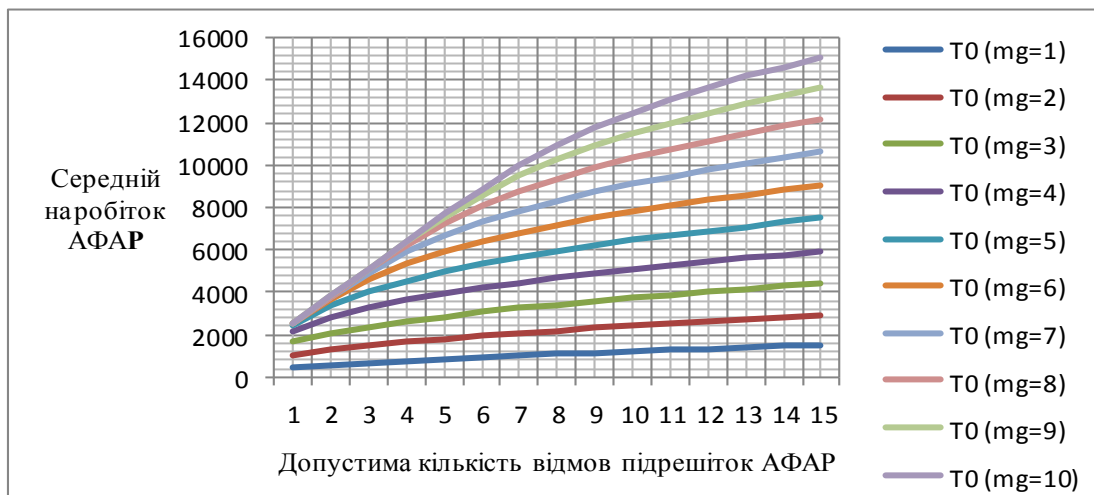


Рисунок 2 – Графіки зміни середнього наробітку до відмови АФАР у залежності від допустимої кількості відмов підрешіток АФАР ( $m_g$ ) за різним числом допустимих відмов приймально-передавальних каналів у підрешітці ( $m_C$ ) за експоненціальним законом розподілу відмов ППК, ПМ і ВДЖ ( $\lambda_{\text{ППК}} = 7 \cdot 10^{-6}$  1/год,  $\lambda_{\text{ПМ}} = 3 \cdot 10^{-6}$  1/ч,  $\lambda_{\text{ВДЖ}} = 5 \cdot 10^{-6}$  1/год)



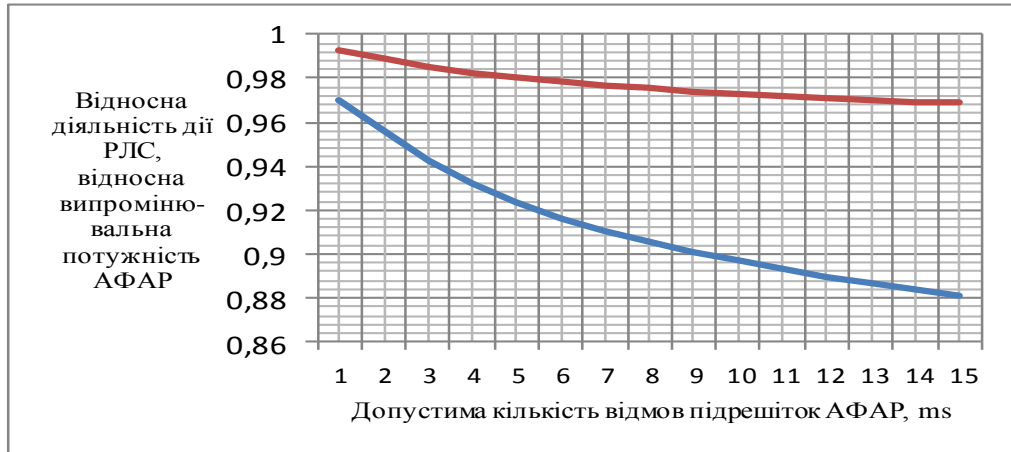


Рисунок 3 – Графіки залежності відносної дальності дії РЛС ( $D/D_0$ ) (червона лінія) і відносно випромінювальної потужності АФАР ( $P/P_0$ ) (синя лінія) від допустимої кількості відмов підрешіток АФАР ( $m_s$ ) за числом допустимих відмов приймально-передавальних каналів у підрешітці  $m_g = 7$  ( $\lambda_{ППК} = 7 \cdot 10^{-6}$  1/год,  $\lambda_{ПМ} = 3 \cdot 10^{-6}$  1/год,  $\lambda_{ВИП} = 5 \cdot 10^{-6}$  1/год)

На рис. 3 видно, що в залежності від кількості допустимих відмов антенних підрешіток  $m_s$ :

– рівень випромінювальної АФАР потужності знижується від значення 0,97 (за  $m_s = 1$ ) до значення 0,88 (за  $m_s = 15$ );

– рівень дальності дії РЛС знижується від значення 0,992 (за  $m_s = 1$ ) до значення 0,97 (за  $m_s = 15$ ).

Таблиця 1 – Матриця можливих станів АФАР РЛС

$m_g \backslash m_s$	$m_s = 4$	$m_s = 5$	$m_s = 6$	$m_s = 7$	$m_s = 8$	$m_s = 9$	$m_s = 10$
$G(i,j)$	$P/P_0, T_0, ч., D/D_0, F(i,4)$	$P/P_0, T_0, ч., D/D_0, F(i,5)$	$P/P_0, T_0, ч., D/D_0, F(i,6)$	$P/P_0, T_0, ч., D/D_0, F(i,7)$	$P/P_0, T_0, ч., D/D_0, F(i,8)$	$P/P_0, T_0, ч., D/D_0, F(i,9)$	$P/P_0, T_0, ч., D/D_0, F(i,10)$
$m_s=2; F(2, j)$	$P/P_0=0,9672; T_0=2794; D/D_0=0,9917; F(2,4)$	$P/P_0=0,9608; T_0=3347; D/D_0=0,9901; F(2,5)$	$P/P_0=0,9572; T_0=3661; D/D_0=0,9891; F(2,6)$	$P/P_0=0,9559; T_0=3775; D/D_0=0,9888; F(2,7)$	$P/P_0=0,9556; T_0=3800; D/D_0=0,9887; F(2,8)$	$P/P_0=0,9556; T_0=3806; D/D_0=0,9887; F(2,9)$	$P/P_0=0,9555; T_0=3807; D/D_0=0,9887; F(2,10)$
$m_s=4; F(4, j)$	$P/P_0=0,9576; T_0=3620; D/D_0=0,989; F(4,4)$	$P/P_0=0,9472; T_0=4536; D/D_0=0,9865; F(4,5)$	$P/P_0=0,9384; T_0=5316; D/D_0=0,9842; F(4,6)$	$P/P_0=0,9319; T_0=5889; D/D_0=0,9825; F(4,7)$	$P/P_0=0,9282; T_0=6219; D/D_0=0,9816; F(4,8)$	$P/P_0=0,9267; T_0=6356; D/D_0=0,9812; F(4,9)$	$P/P_0=0,9262; T_0=6399; D/D_0=0,9810; F(4,10)$
$m_s=5; F(5, j)$	$P/P_0=0,9541; T_0=3931; D/D_0=0,9883; F(5,4)$	$P/P_0=0,9424; T_0=4961; D/D_0=0,9853; F(5,5)$	$P/P_0=0,9319; T_0=5894; D/D_0=0,9825; F(5,6)$	$P/P_0=0,9232; T_0=6668; D/D_0=0,9802; F(5,7)$	$P/P_0=0,9171; T_0=7224; D/D_0=0,9786; F(5,8)$	$P/P_0=0,9136; T_0=7542; D/D_0=0,9777; F(5,9)$	$P/P_0=0,9121; T_0=7677; D/D_0=0,9773; F(5,10)$
$m_s=6; F(6, j)$	$P/P_0=0,9509; T_0=4204; D/D_0=0,9875; F(6,4)$	$P/P_0=0,9383; T_0=5325; D/D_0=0,9842; F(6,5)$	$P/P_0=0,9265; T_0=6376; D/D_0=0,9811; F(6,6)$	$P/P_0=0,9162; T_0=7307; D/D_0=0,9784; F(6,7)$	$P/P_0=0,9079; T_0=8062; D/D_0=0,9761; F(6,8)$	$P/P_0=0,9022; T_0=8592; D/D_0=0,9746; F(6,9)$	$P/P_0=0,8989; T_0=8888; D/D_0=0,9737; F(6,10)$
$m_s=7; F(7, j)$	$P/P_0=0,9481; T_0=4451; D/D_0=0,9868; F(7,4)$	$P/P_0=0,9346; T_0=5646; D/D_0=0,9832; F(7,5)$	$P/P_0=0,9219; T_0=6792; D/D_0=0,9799; F(7,6)$	$P/P_0=0,9103; T_0=7846; D/D_0=0,9768; F(7,7)$	$P/P_0=0,9004; T_0=8762; D/D_0=0,9741; F(7,8)$	$P/P_0=0,8925; T_0=9488; D/D_0=0,9720; F(7,9)$	$P/P_0=0,8873; T_0=9983; D/D_0=0,9705; F(7,10)$

$m_s=8$ ; F(8,j)	P/P <sub>0</sub> =0,9456; T <sub>0</sub> =4676; D/D <sub>0</sub> =0,9861 F(8,4)	P/P <sub>0</sub> =0,9314; T <sub>0</sub> =5936; D/D <sub>0</sub> =0,9824 F(8,5)	P/P <sub>0</sub> =0,9178 T <sub>0</sub> =7160; D/D <sub>0</sub> =0,9788 F(8,6)	P/P <sub>0</sub> =0,9052 T <sub>0</sub> =8313; D/D <sub>0</sub> =0,9754 F(8,7)	P/P <sub>0</sub> =0,8939 T <sub>0</sub> =9359; D/D <sub>0</sub> =0,9723 F(8,8)	P/P <sub>0</sub> =0,8844 T <sub>0</sub> =10251; D/D <sub>0</sub> =0,9698 F(8,9)	P/P <sub>0</sub> =0,8771 T <sub>0</sub> =10940; D/D <sub>0</sub> =0,9678 F(8,10)
$m_s=9$ ; F(9,j)	P/P <sub>0</sub> =0,9432 T <sub>0</sub> =4886; D/D <sub>0</sub> =0,9855 F(9,4)	P/P <sub>0</sub> =0,9284; T <sub>0</sub> =6201; D/D <sub>0</sub> =0,9816; F(9,5)	P/P <sub>0</sub> =0,9142 T <sub>0</sub> =7491; D/D <sub>0</sub> =0,9778 F(9,6)	P/P <sub>0</sub> =0,9007 T <sub>0</sub> =8728; D/D <sub>0</sub> =0,9742 F(9,7)	P/P <sub>0</sub> =0,8884 T <sub>0</sub> =9880; D/D <sub>0</sub> =0,9708 F(9,8)	P/P <sub>0</sub> =0,8745 T <sub>0</sub> =10907; D/D <sub>0</sub> =0,9670 F(9,9)	P/P <sub>0</sub> =0,8685 T <sub>0</sub> =11766; D/D <sub>0</sub> =0,9654 F(9,10)
$m_s=10$ ; F(10,j)	P/P <sub>0</sub> =0,9410 T <sub>0</sub> =5083; D/D <sub>0</sub> =0,9849 F(10,4)	P/P <sub>0</sub> =0,9257; T <sub>0</sub> =6447; D/D <sub>0</sub> =0,9809; F(10,5)	P/P <sub>0</sub> =0,9108 T <sub>0</sub> =7795; D/D <sub>0</sub> =0,9769 F(10,6)	P/P <sub>0</sub> =0,8967 T <sub>0</sub> =9103; D/D <sub>0</sub> =0,9731 F(10,7)	P/P <sub>0</sub> =0,8834 T <sub>0</sub> =10342; D/D <sub>0</sub> =0,9695 F(10,8)	P/P <sub>0</sub> =0,8714 T <sub>0</sub> =11482; D/D <sub>0</sub> =0,9662 F(10,9)	P/P <sub>0</sub> =0,8610 T <sub>0</sub> =12484; D/D <sub>0</sub> =0,9633 F(10,10)
$m_s=11$ ; F(11,j)	P/P <sub>0</sub> =0,9389 T <sub>0</sub> =5269; D/D <sub>0</sub> =0,9844 F(11,4)	P/P <sub>0</sub> =0,9231; T <sub>0</sub> =6678; D/D <sub>0</sub> =0,9802; F(11,5)	P/P <sub>0</sub> =0,9078 T <sub>0</sub> =8078; D/D <sub>0</sub> =0,9761 F(11,6)	P/P <sub>0</sub> =0,893; T <sub>0</sub> =9446; D/D <sub>0</sub> =0,9721 F(11,7)	P/P <sub>0</sub> =0,879; T <sub>0</sub> =10760; D/D <sub>0</sub> =0,9683 F(11,8)	P/P <sub>0</sub> =0,8661 T <sub>0</sub> =11990; D/D <sub>0</sub> =0,9647 F(11,9)	P/P <sub>0</sub> =0,8545 T <sub>0</sub> =13115; D/D <sub>0</sub> =0,9615 F(11,10)
$m_s=12$ ; F(12,j)	P/P <sub>0</sub> =0,9369 T <sub>0</sub> =5446; D/D <sub>0</sub> =0,9838 F(12,4)	P/P <sub>0</sub> =0,9207; T <sub>0</sub> =6896; D/D <sub>0</sub> =0,9796; F(12,5)	P/P <sub>0</sub> =0,9049 T <sub>0</sub> =8342; D/D <sub>0</sub> =0,9753 F(12,6)	P/P <sub>0</sub> =0,8896 T <sub>0</sub> =9764; D/D <sub>0</sub> =0,9712 F(12,7)	P/P <sub>0</sub> =0,8751 T <sub>0</sub> =11134; D/D <sub>0</sub> =0,9672 F(12,8)	P/P <sub>0</sub> =0,8613 T <sub>0</sub> =12457; D/D <sub>0</sub> =0,9634 F(12,9)	P/P <sub>0</sub> =0,8488 T <sub>0</sub> =13678; D/D <sub>0</sub> =0,9598 F(12,10)

У табл. 1 показані стани матриці з допустимими (граничними) значеннями показників ефективності АФАР. Червоним кольором позначені граничні стани з обмеженням по відносній випромінювальній потужності:  $P/P_0=0,95$  – стани (2,7), (2,8), (2,9), (2,10), (3,6), (4,5), (6,4);  $P/P_0=0,90$  – стани (6,9), (7,8), (14,6);  $P/P_0=0,85$  – стани (12,10), (15,9). Зеленим кольором позначені граничні стани з обмеженням по мінімальному рівню ближніх бічних пелюстків  $F_{\sigma\_min}$ . (зворотно пропорційно виразу  $m_g \times m_s$ ):  $m_g \times m_s=27-32$  – стани (3,9), (3,10), (4,7), (4,8), (5,6), (6,5), (8,4), (10,3), (15,2);  $m_g \times m_s=60-64$  – стани (6,10), (7,9), (8,8), (9,7), (10,6), (12,5), (15,4);  $m_g \times m_s=88-91$  – стани (9,10), (10,9), (11,8), (13,7), (15,6). Сукупності граничних станів розмежовують матрицю станів на область працездатних станів АФАР – зліва від граничних станів і область непрацездатних станів – справа від граничних станів.

## 6. Висновки

1. АФАР є надлишковою системою, показники надійності якої визначаються допустимими значеннями показників ефективності: відносною випромінювальною потужністю і мінімальним рівнем ближніх бічних пелюстків амплітудно-фазового розподілу діаграми спрямованості.
2. Імовірно-фізична модель надійності АФАР дозволяє визначити області працездатних і непрацездатних станів АФАР, яка формалізується побудовою матриці можливих станів АФАР.
3. Запропоновані в роботі методи розрахунку середнього наробітку до відмови та ймовірності безвідмовної роботи АФАР можуть бути використані під час проектування і експлуатації РЛС, які не обслуговуються.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Agrawal K.A., Holzman E.L. Active Phased Array Design for High Reliability. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*. 1999. Vol. 35, N 4. P. 1204–1211.
2. Agrawal K.A., Holzman E.L. Beamformer Architectures for Active Phased-Array Radar Antennas. *IEEE Transactions on antennas and propagation*. 1999. Vol. 47, N3. P. 432–442.

3. Ashok K. Agrawal, Bruce A. Kopp, Mark H. Luesse, Kenneth W. O'Haver Active Phased Array Antenna Development for Modern Shipboard Radar Systems Ashok K. *Active phased array antenna development johns hopkins apl technical direct*. 2001. Vol. 22, N 4. P. 600–612.
4. Карцан И.Н., Киселева Е.А., Логачева А.И., Карцан Т.И. Зависимость характеристик активной антенной решетки от наработки. *Научный альманах*. 2017. № 7–1 (33). С. 189–192.
5. Kostanovskii V.V. A mathematical model for calculating the reliability of nonreducible phased antenna arrays. *Measurement Techniques*. 2014. Т. 57, № 1. P. 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. № 3. С. 201–212.
7. Костановський В.В. Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, які враховують раптові 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. N 3/9 (99). С. 31–40.
9. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200136419>.
10. ГОСТ 2.103-83. Надежность в технике. Критерии отказов и предельных состояний. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006967>.
11. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: учеб. пособ. / ред. Д.И. Воскресенского. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.

*Стаття надійшла до редакції 23.10.2019*