

DOI: 10.18372/2310-5461.48.15126

УДК 623.6-523.8:623.4.017

О. Д. КозачукДП «НДІ» Квант», м. Київ
orcid.org/0000-0003-0905-1093
e-mail: kozaichyk@gmail.com;**В. В. Костановський**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.ДП «НДІ» Квант», м. Київ
orcid.org/0000-0002-3766-4455
e-mail: kostanval03@gmail.com;**І. О. Мачалін**, д-р техн. наук, проф.Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-1684-4980
e-mail: igor.machalin@ukr.net;**І. Є. Терентьєва**, канд. техн. наук, доц.Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-0391-5041
e-mail: i.terentyeva@ukr.net**РОЗРОБКА МЕТОДУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДО ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ
КАНАЛІВ І МОДУЛІВ АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ****Вступ**

Активна фазована антенна решітка (АФАР) радіолокаційної станції (РЛС) призначена для посилення зондуючих сигналів до необхідного високого рівня потужності, випромінювання їх в заданому напрямку, приймання відбитих від цілей ехо-сигналів, а також для практично безінерційного електронного сканування променів у заданому кутовому секторі за азимутом і кутам місця. Функціонально до складу АФАР входять: $N_0 = S_0 G_0$ приймально-передавальних каналів, S_0 (кілька десятків або сотень) підрешіток, кожна з яких складається з апертури підрешітки з G_0 випромінювачами та G_0/W W -тих каналних антенних приймально-передавальних модулів і вторинних джерел електроживлення.

Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень і публікацій

Архітектура АФАР характеризується дворівневою структурною схемою надійності. Елементами першого рівня структурної схеми надійності — це антенні приймально-передавальні модулі (АППМ), які конструктивно включають в свій склад набір з декількох передавальних і приймальних каналів, і модулів вторинного електроживлення (МВЖ). Елементами другого рівня є антенні підрешітки, приймально-передавальні модулі підрешітки (ППМП) і модулі вторинного електроживлення (МВЖ).

Формули для визначення середнього нароби́тку до відмови АФАР РЛС з дворівневою схемою надійності представлені у працях [1; 2; 3].

Для забезпечення вимог щодо надійності технічного завдання на розробку АФАР РЛС необхідна розробка вимог до надійності каналів і модулів антенної решітки.

Мета дослідження

Метою даного дослідження є розробка методу визначення вимог щодо надійності каналів і модулів антенної решітки для експоненціального та дифузійного немонотонного розподілах відмов.

Дослідження моделі надійності АФАР з однорівневою ССН

Розглянемо модель надійності АФАР з однорівневою структурною схемою надійності (ССН) антенної решітки. Кількість працездатних ППК в антенній підрешітці визначається за формулою:

$$G(t) = P_{\text{МВЖ}}(t) P_{\text{ППК}} G_0. \quad (1)$$

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

$$t_{\text{відм}} = T_{0_підр}.$$

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

$$G(t_{\text{відм}} = T_{0_підр}) = G_0 - m_G - 1, \quad (2)$$

де m_G — допустима кількість відмов у антенній підрешітці.

Використовуючи формулу (1) та рівність (2), можна записати

$$P_{\text{МВЖ}}(t_{\text{відм}} = T_{0_А.підр}) P_{\text{ППК}}(t_{\text{відм}} = T_{0_А.підр}) G_0 = G_0 - m_G - 1. \quad (3)$$

Розділивши ліву та праву частини рівності (3) на G_0 , отримуємо таке рівняння:

$$P_{\text{МВЖ}}(t_{\text{відм}} = T_{0_А.підр}) P_{\text{ППК}}(t_{\text{відм}} = T_{0_А.підр}) = 1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0}. \quad (4)$$

Для випадку експоненціального розподілу відмов вираз (4) після перетворення спрощується та буде мати такий вигляд:

$$\exp[(\lambda_{\text{ППК}} + \lambda_{\text{МВЖ}})T_{0_А.підр}] = 1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0}. \quad (5)$$

Логарифмування правої і лівої частин рівності (5) дозволяє отримати остаточні формули для визначення показників надійності антенної підрешітки:

– середнього наробітку до відмови

$$\frac{T_{0_А.підр}}{T_{0_ППК}} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0}\right)}{1 + \frac{T_{0_ППК}}{T_{0_ВП}}}; \quad (6)$$

– інтенсивності відмов

$$\lambda_{\text{ППК}} = -\frac{\lambda_{\text{ППК}} + \lambda_{\text{МВЖ}}}{\ln\left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0}\right)}. \quad (7)$$

Дослідження моделі надійності АФАР з дворівневою ССН [3.14, 3.17]

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

Розглянемо структурну схему АФАР, яка описується дворівневою ССН. Кількість ППК, що відмовили у дворівневій АФАР визначається за формулою:

$$\Delta N = N_0 \left\{ 1 - P_{\text{ППК}}(t) P_{\text{ППМП}}(t) [P_{\text{МВЖ}}(t)]^2 \right\}. \quad (8)$$

Використовуючи формулу (6), можна вивести рівняння для визначення середнього наробітку до відмови АФАР — $T_{0_АФАР_1}$:

$$(\Delta N) + 1 = N_0 \left\{ 1 - P_{\text{ППК}}(T_{0_АФАР_1}) \times P_{\text{ППМП}}(T_{0_АФАР_1}) [P_{\text{МВЖ}}(T_{0_АФАР_1})]^2 \right\}. \quad (9)$$

Для експоненціального розподілу відмов каналів та АФАР рівняння (6) трансформується у формулу для визначення нормованого наробітку до відмови передавальної АФАР:

$$\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ППК}} = -\frac{\ln\left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0 S_0}\right)}{1 + \frac{T_{0_ППК}}{T_{0_ППМП}} + \frac{2T_{0_ППК}}{T_{0_МВЖ}}}. \quad (10)$$

Для визначення безвідмовної роботи АФАР з дворівневою ССН використовується класична формула для резервованої невідновлювальної структури зі змінним резервом [3]:

Для забезпечення вимог щодо надійності технічного завдання на розробку АФАР РЛС необхідна розробка вимог до надійності каналів і модулів антенної решітки.

Виклад основного матеріалу дослідження

Основним найбільш масовим і ненадійним типом модулів антенної решітки, що визначають надійність АФАР, є антенний приймально-передавальний модуль (АППМ), який конструктивно включає до свого складу кілька приймально-передавальних каналів (ППК).

Якщо вимоги до середнього наробітку до відмови ППК прирівняти до 1,00 (одиниці), то вимоги до середнього наробітку до відмови приймально-передавального модулю підрешітки (ППМП) і модулів вторинного живлення повинні бути в 10 (десять разів) менш жорсткі, тобто вимоги необхідно прирівнювати відповідно до 0,100, тобто:

$$T_{0_ППК} = 0,10T_{0_ППМП} = 0,10T_{0_МВЖ}. \quad (11)$$

Визначення вимог до середнього наробітку до відмови ППК для експоненціального розподілу відмов модулів

Відношення середнього наробітку до відмови АФАР до середнього наробітку до відмови ППК визначається за формулою [1\$ 2]:

$$\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ППК}} = -\frac{\ln\left(1 - \frac{m_G}{G_0} - \frac{1}{G_0 S_0}\right)}{1 + \frac{T_{0_ППК}}{T_{0_ППМП}} + \frac{2T_{0_ППК}}{T_{0_МВЖ}}}. \quad (12)$$

Приклад. Визначимо вимоги до надійності ППК для АФАР з наступними характеристиками: $N_0 = 6400$, $S_0 = 100$, $G_0 = 64$.

Якщо допустиме зниження максимальної дальності РЛС дорівнює 0,10 — $(\Delta D/D_0)$ доп. = 0,10, то з урахуванням основного рівняння радіолокації для допустимої відносної кількості відмов ППК маємо [3]:

$$\frac{m_G}{G_0} \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)_{\text{доп}} \approx 2(\Delta D/D_0)_{\text{доп}} = 0,20.$$

Тоді за значеннями

$$\frac{T_{0_A_підр}}{T_{0_ППМГ}} = 0,10; \quad \frac{T_{0_ППК}}{T_{0_МВЖ}} = 1,20;$$

при $N_0 = G_0 S_0 = 6400$ ППК для формули (2) маємо:

$$\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ППК}} = - \frac{\ln \left(1 - 0,20 - \frac{1}{6400} \right)}{1 + 0,10 + 0,20} = 0,172. \quad (13)$$

Тобто, для забезпечення допустимого зниження максимальної дальності не більш ніж на 10% необхідне значення середнього наробітку до відмови ППК має бути не менше значення, що дорівнює $(T_{0_АФАР_1})_{\text{тр}} / 0,172$:

$$(T_{0_ППК})_{\text{вим}} = \frac{(T_{0_АФАР})_{\text{вим}}}{1,172} = 5,82 (T_{0_АФАР})_{\text{вим}}. \quad (14)$$

Визначення вимог до середнього наробітку до відмови ППК для композиції ЕР і ДНР відмов ППК [4]

Для композиції експоненціального (ЕР) і дифузійного немонотонного (ДНР) розподілів (під час 50% раптових і поступових відмов ППК), вимоги до середнього наробітку до

відмови ППК повинні бути у два рази легші, тобто мати значення:

$$(T_{0_ППК})_{\text{вим}} = 2,91 = (T_{0_АФАР})_{\text{вим}}. \quad (15)$$

Висновки

У роботі проведено дослідження моделей надійності АФАР з однорівневою та дворівневою ССН. Розроблено вимоги до надійності приймально-передавальних модулів АФАР для експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів відмов при допустимому зниженні максимальної дальності РЛС, яка дорівнює 0,10.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Kostanovskiy V.**, Machalin I., Kozachuk O., Terentyeva I. Construction of a generalized probabilistic-physical model of reliability of two-level active phased antenna array. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2019. Vol. 3/9 (99). P. 31–40. DOI:/10.15587/1729-4061.2018.168523.
2. **Костановский В. В.**, Мачалин И. А. Разработка и исследование универсальной модели надежности активной фазированной антенной решетки РЛС. *Збірник наукових праць «Водний транспорт»*. 2020. Вып. №1 (29). С. 31–45.
3. **Костановський В. В.**, Демченко О. В., Козачук О. Д., Мачалін І. О. Модель розрахунку показників надійності АФАР за критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС. *Наукоємні технології*. 2020. №1. С. 1–10.
4. **Костановський В. В.** Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, які враховують раптові та поступові відмови модулів надвисоких частот. *Математичні машини і моделі*. 2014. №2. С. 142–150.

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

У роботі проведено дослідження моделей надійності АФАР з однорівневою та дворівневою ССН. Розроблено метод визначення вимог до показників надійності каналів і модулів активної фазованої антенної решітки для забезпечення заданої надійності антенної решітки. Представлені вимоги до середнього наробітку до відмови приймально-передавального СВЧ модуля підрешітки і модуля вторинного електроживлення по відношенню до середнього наробітку до відмови випромінюючого приймально-передавального СВЧ каналу. Розглянуто приклад визначення вимог до середнього наробітку до відмови приймально-передавальної АФАР для експоненціального розподілу і композиції дифузійного немонотонного і експоненціального розподілів (50% раптових і 50% поступових відмов). Визначено вимоги щодо надійності при 10% допустимому зниженні максимальної дальності РЛС, що відповідає 20% допустимих відмов приймально-передавальних каналів.

Ключові слова: надійність антенної решітки; приймально-передавальний канал; експоненціальний розподіл; відмови каналів; технічне обслуговування.

Kozachuk O. D., Kostanovskiy V. V., Machalin I. O., Terentieva I. Ye.

DEVELOPMENT OF A METHOD AND DETERMINATION OF REQUIREMENTS FOR RELIABILITY INDICATORS OF CHANNELS AND MODULES OF AN ACTIVE PHASED ANTENNA ARRAY

The study of reliability models of AFAR with one-level and two-level SSR was carried out. In this article, we propose the method for determining the requirements for the reliability indicators of channels and modules of the active phased antenna array to ensure the specified reliability of the antenna array. Requirements for the mean time to failure of the transceiving microwave subarray module and the secondary power supply module are presented in relation to the mean time to failure of the transceiving microwave channel. The example of determining the requirements for the mean time to failure of a transceiving AESA for an exponential distribution and composition of diffusion non-monotonic and exponential distributions (50 % sudden and 50 % gradual failures) is considered. The requirements for reliability are determined under the condition of the permissible decrease in the maximum range of the radar on value of 10%, which corresponds to 20 % of the permissible failures of the transceiving channels.

Keywords: reliability of the antenna array; transceiving channel; exponential distribution; channel failures; operation and maintenance.

Козачук О. Д., Костановский В. В., Мачалин И. А., Терентьева И. Е.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПОКАЗАТЕЛЯМ НАДЕЖНОСТИ КАНАЛОВ И МОДУЛЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

В работе проведено исследование моделей надежности АФАР с одноуровневой и двухуровневой ССН. Разработан метод определения требований к показателям надежности каналов и модулей активной фазированной антенной решетки для обеспечения заданной надежности антенной решетки. Представлены требования к средней наработке до отказа приемо-передающего СВЧ модуля подрешетки и модуля вторичного электропитания по отношению к средней наработке до отказа излучающего приемо-передающего СВЧ канала. Рассмотрен пример определения требований к средней наработке до отказа приемо-передающей АФАР для экспоненциального распределения и композиции диффузионного немонотонного и экспоненциального распределений (50% внезапных и 50 % постепенных отказов). Определены требования по надежности при 10% допустимом снижении максимальной дальности РЛС, что соответствует 20 % допустимых отказов приемо-передающих каналов.

Ключевые слова: надежность антенной решетки; приемо-передающий канал; экспоненциальное распределение; отказы каналов; техническое обслуживание.

Стаття надійшла до редакції 16.09.2020 р.
Прийнято до друку 10.12.2020 р.