

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

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОФІЛАКТИЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ РЛС

Вступ

В останні роки у військовій та цивільних галузях широке поширення набуло застосування радіолокаційних станцій (РЛС) з активними фазованими антенними решітками (АФАР). Сучасні наземні та корабельні АФАР багатофункціональних РЛС представляють собою конструкції, що включають в свій склад від декількох тисяч до десятків тисяч СВЧ елементів: випромінюючих каналів, фазовращателів, атенуаторів, прийомних каналів і джерел вторинного електроживлення. Вартість сучасних АФАР коливається від десятків до сотень мільйонів доларів. Конструктивно АФАР будуються як квазінадлишкові системи, у яких квазінадлишковими можуть бути від кількох сотень до кількох тисяч приймально-передавальних каналів. При цьому витрати на технічне обслуговування і експлуатацію РЛС з АФАР є дуже великими і можуть перевищувати обсяг витрат на їх виготовлення.

Тому актуальною є проблема розробки математичних моделей надійності та технічного обслуговування АФАР багатофункціональних РЛС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питанням розробки математичних моделей надійності АФАР РЛС в аналізованій літературі присвячено ряд робіт [1–7].

Найбільш цікавими є модель надійності передавальної АФАР за критерієм допустимого зниження рівня максимальної дальності РЛС і дворівнева модель надійності АФАР (далі дворівневої АФАР) [5–7].

Питанням організації оптимального технічного обслуговування АФАР присвячений ряд робіт, у яких АФАР розглядається як дворівнева система на 20–400 СВЧ випромінювачів [8; 9].

У праці [10] представлений алгоритм обслуговування АФАР за результатами оцінки фактичного технічного стану. Структурні схеми АФАР багатофункціональних РЛС є дворівневими, структурна схема АФАР включає до свого складу кілька десятків підрешіток. Кожна підрешітка включає до свого складу кілька десятків випромінюючих (передавальних) каналів. Однак питання організації оптимального технічного обслуговування дворівневих АФАР в літературі не розглядалися.

Аналіз робіт з оцінювання показників надійності та технічного обслуговування АФАР РЛС показав, що в даний час є актуальною проблема побудови моделей оптимального технічного обслуговування дворівневих АФАР в процесі проектування і розробка методів обслуговування АФАР за технічним станом в процесі експлуатації.

Мета роботи: побудова математичної моделі оптимального профілактичного обслуговування дворівневою АФАР і визначити основні техніко-економічні характеристики і критерії оптимізації профілактичного обслуговування (ПО).

Постановка завдання

Передбачається, що профілактичне обслуговування (профілактика) передавальною АФАР РЛС проводиться з періодичністю, за якою передбачається повна заміна усіх відмовних

елементів АФАР. Після ПО інтенсивність відмов антенної решітки падає до нуля. Періодичність ПО не залежить від числа відмов, які сталися в перерви між профілактиками, а аварійний ремонт (АР) не впливає на інтенсивність відмов АФАР.

При оптимізації ПО використовуються або технічна характеристика ефективності, коефіцієнт технічного використання (КТВ) — $K_{TAF}(\tau)$, або, відповідна йому економічна характеристика ефективності, питомі експлуатаційні витрати (ПЕВ) — $C(\tau)$. Оптимізація ПО проводиться за критерієм максимуму $K_{TAF}(\tau)$ (пряма задача) або

$$P_{RAD.MOD.}(t = T_{0_RAD.APAR})P_{SPS}(t = T_{0_RAD.APAR})P_{RAD.SLAPAR}(t = T_{0_RAD.APAR}) = 1 - C_{RAD.} - \frac{1}{S_R}, \quad (1)$$

де $C_{RAD.} = 2\Delta D/D$ — коефіцієнт надмірності випромінювальних (передавальних) каналів АФАР, що дорівнює подвійному допустимому зниженню рівня максимальної дальності РЛС з передавальної АФАР; S_R — число підрешіток в АФАР; G_R — число випромінюючих каналів в підрешітці.

Аналітичні вирази для імовірнісних характеристик передавальної АФАР [6]

– імовірність безвідмовної роботи передавальної підрешітки:

$$P_{RAD.SLAPAR}(t) = P_{SPS}(t) \sum_{i=0}^{m_{RAD.CHAN}} C_{G_R}^i [P_{RAD.CHAN}(t)]^{G_R-i} [Q_{RAD.CHAN}(t)]^i, \quad (2)$$

$$\text{де } P_{RAD.CHAN}(t) = \exp(-\lambda_{RAD.CHAN}t), P_{SPS}(t) = \exp(-\lambda_{SPS}t), Q_{RAD.CHAN}(t) = 1 - P_{RAD.CHAN}(t)$$

імовірність безвідмовної роботи передавальної АФАР;

$$P_{RAD.APAR}(t) = \sum_{i=0}^{m_{RAD.SLAPAR}} C_{S_R}^i [P_{RAD.SLAPAR}(t)]^{S_R-i} \times [Q_{RAD.SLAPAR}(t)]^i, \quad (3)$$

де $P_{RAD.CHAN}(t)$, $P_{RAD.MOD}(t)$, $P_{SPS}(t)$, $P_{RAD.SLAPAR}(t)$ — імовірності безвідмовної роботи приймально-передавальних каналів (в режимі випромінювання), модулів вторинних джерел живлення і передавальної підрешітки відповідно; $m_{RAD.CHAN}$ — допустима кількість відмов випромінюючих каналів у передавальній підрешітці; $m_{RAD.SLAPAR}$ — допустима кількість відмов передавальних підрешіток в АФАР:

$$m_{RAD.CHAN} = G_R C_{RAD.}, m_{RAD.SLAPAR} = S_R C_{RAD.} \quad (4)$$

за критерієм мінімуму математичного очікування $C(\tau)$ (зворотна задача) [8; 9].

Вирішення завдання

Математична модель надійності передавальної АФАР

Математична модель надійності дворівневої передавальної АФАР представлена в працях [5; 6].

Середній наробіток до відмови передавальної АФАР — T_{0_APAR} визначається з рішення трансцендентного рівняння:

Математична модель оптимізації профілактичного обслуговування передавальної АФАР

Аналогічно до праць [8; 9] позначимо τ — періодичність ПО передавальної АФАР; τ_p і c_p — відповідно, тривалість та вартість проведення ПО АФАР; τ_R і c_R — тривалість та вартість збитку під час ФАР; $P_{RAD.APAR}$ — імовірність безвідмовної роботи ФАР відповідно.

Тоді аналітичний вираз для коефіцієнта технічного використання (КТВ — total availability factor) передавальних АФАР має вигляд:

$$K_{TAF}(\tau) = \frac{\tau}{\tau + \tau_p - \tau_R * \ln P_{RAD.APAR}(\tau)}, \quad (5)$$

Аналітичний вираз математичного очікування ПЕВ для ФАР передавальних АФАР має вигляд:

$$M[C(\tau)] = \frac{C_p - C_R \ln P_{RAD.APAR}(\tau)}{\tau}, \quad (6)$$

де

$$\tau_p = \tau_R N [1 - P_{RAD.CHAN}(\tau)], C_p = C_{P1} N [1 - P_{RAD.CHAN}(\tau)].$$

Оптимальна періодичність профілактичного обслуговування передавальної АФАР визначається з рішення трансцендентного рівняння:

$$S(\tau) = \varepsilon, \quad (7)$$

де

$$S(\tau) = \frac{\ln [P_{APAR}(\tau)] + \tau \Lambda_{APAR}(\tau)}{N [1 - P_{RAD.CHAN}(\tau) - \tau f_{RAD.CHAN}(\tau)]}$$

$\varepsilon = \frac{\tau_{P1}}{\tau_R}$ — під час оптимізації за критерієм max

КТВ; $\varepsilon = \frac{C_{P1}}{C_R}$ — під час оптимізації за критерієм min м.о. ПЕВ

Для визначення щільності розподілу ймовірностей і інтенсивності відмов антенною підрешітки і АФАР в цілому використовуються формули для біноміального розподілу:

$$P_C(t) = \sum_{i=0}^m C_n^i Q^i(t) P^{n-i}(t), \quad (8)$$

$$f_C(t) = (n - m) C_n^m Q^m(t) P^{n-m-1}(t) f(t), \quad (9)$$

$$\Lambda_C(t) = \frac{(n - m) C_n^m Q^m(t) P^{n-m}(t) f(t)}{\sum_{i=0}^m C_n^i Q^i(t) P^{n-i}(t)}, \quad (10)$$

Ефективність оптимізації ПО передавальної АФАР оцінюється виграшами від оптимізації:

виграш за КТВ (total availability factor)

$$W [K_{TAF}(\tau_{opt})] = \left[1 - \frac{K_{TAF}(T_{0_APAR})}{K_{TAF}(\tau_{opt})} \right] 100\% \quad (11)$$

та виграш за м. о. УЕР

$$W \{M [C(\tau_{opt})]\} = \left\{ 1 - \frac{M [C(\tau_{opt})]}{M [C(T_{0_APAR})]} \right\} 100\% . \quad (12)$$

Ілюстративний приклад визначення показників оптимального профілактичного обслуговування передавальної АФАР РЛС

Вихідні дані:

Допустиме зниження рівня максимальної дальності РЛС с передавальної АФАР становить $\Delta D/D = 10\%$, тоді відповідно, $C_{RAD} = 0,20$.

Структурна схема надійності передавальної дворівневої АФАР РЛС включає [6]:

$N_R = 6400$ передавальних каналів;

$S_R = 100$ передавальних антенних підрешіток;
 $G_R = 64$ передавальних каналів в антенній підрешітці;

$m_{RAD.CHAN.} = 14$ — допустима кількість відмов випромінювальних каналів в передавальній антенній підрешітці;

$m_{RAD.SPALAR.} = 20$ — допустима кількість відмов передавальних антенних підрешіток у передавальній АФАР.

Відмови передавальних каналів і модулів розподіляються за експоненціальним законом.

Середній наробіток до відмови випромінювальних СВЧ каналів АФАР — $T_{0_RAD.CHAN.}$ змінюються від 50 тис. год до 200 тис. год (інтенсивність відмов $\lambda_{RAD.CHAN.}$ змінюється в діапазоні від $0,000005 \text{ год}^{-1}$ до $0,00002 \text{ год}^{-1}$).

Середній наробіток до відмови випромінювальних СВЧ каналів модулів антенною підрешітки $T_{0_RAD.MOD}$ рівні 1,0 млн год (інтенсивність відмов $\lambda_{RAD.MOD} = 0,000001 \text{ год}^{-1}$).

Середній наробіток до відмови модулів вторинного електроживлення T_{0_SPS} дорівнюють 1,0 млн год (інтенсивність відмов $\lambda_{SPS} = 0,000001 \text{ год}^{-1}$). Щільність розподілу ймовірності відмов передавальної підрешітки АФАР:

$$f_{RAD.SPALAR}(t) = 50 C_{64}^{14} [P_{RAD.CHAN}(t)]^{50} \times [Q_{RAD.CHAN.}(t)]^{14}, \quad (13)$$

$$f_{APAR}(t) = 80 C_{100}^{20} [P_{RAD.CHAN}(t)]^{80} \times [Q_{RAD.CHAN.}(t)]^{20}, \quad (14)$$

щільність розподілу ймовірності відмов передавальної АФАР (див. таблицю).

Результати рішення ілюстративного прикладу (рис. 1, 2, 3, 4).

Таблиця

Вихідні дані і результати розрахунків показників надійності та технічного обслуговування передавальної АФАР

Позначення передавальної АФАР	АРАР-1	АРАР-2	АРАР-3
Середній наробіток до відмови випромінювальних каналів	200 000 год	100 000 год	50 000 год
Інтенсивність відмов випромінюючих каналів	0,000005 1/год	0,00001 1/год	0,00002 1/ год
Середній наробіток до відмови передавальної АФАР	41336 год (1,00)	20735 год (1,00)	10384 год (1,00)
Значення ймовірності безвідмовної роботи АФАР при наробітку, відповідної оптимальної періодичності ПО	0,9987	0,9986	0,9985
Оптимальна періодичність ПО АФАР за критерієм: максимуму КТИ, мінімуму м.о. УЕР	36219 год (0,8762)	18205 год (0,8780)	9126 год (0,8788)
	35992 год (0,8707)	18093 год (0,8726)	9071 год (0,8745)
Виграш від оптимізації ПО АФАР за критерієм: максимуму КТИ, мінімуму М.О УЕР	0,698 %	1,35 %	2,56 %
	48,7 %	48,5 %	44,5 %

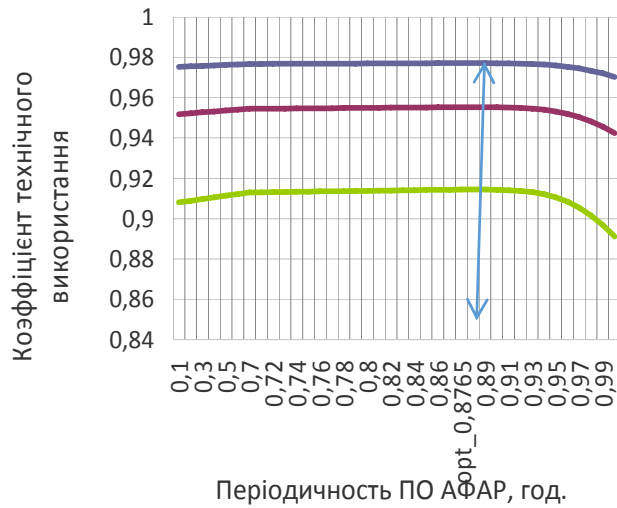


Рис. 1. Графіки залежності коефіцієнта технічного використання від періодичності проведення профілактичного обслуговування АФАР для різних значень інтенсивності відмов випромінювальних каналів: RAD.CHAT = 0,000005 1/год — синього кольору; □ □ RAD.CHAT = 0,00001 1/год — червоного кольору; □ □ RAD.CHAT = 0,00002 1/год — зеленого кольору

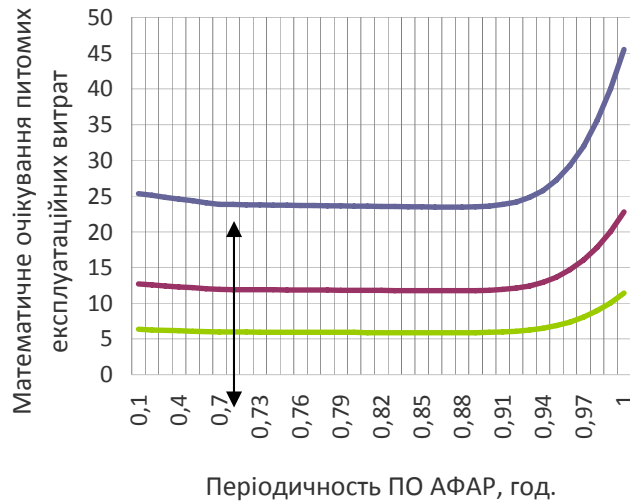


Рис. 2. Графіки залежності математичного очікування питомих експлуатаційних витрат від періодичності проведення профілактичного обслуговування АФАР для різних значень інтенсивності відмов випромінюючих каналів: RAD.CHAT = 0,000005 1/год — синього кольору; RAD.CHAT = 0,00001 1/год — червоного кольору; AD.CHAT = 0,00002 1/год — зеленого кольору

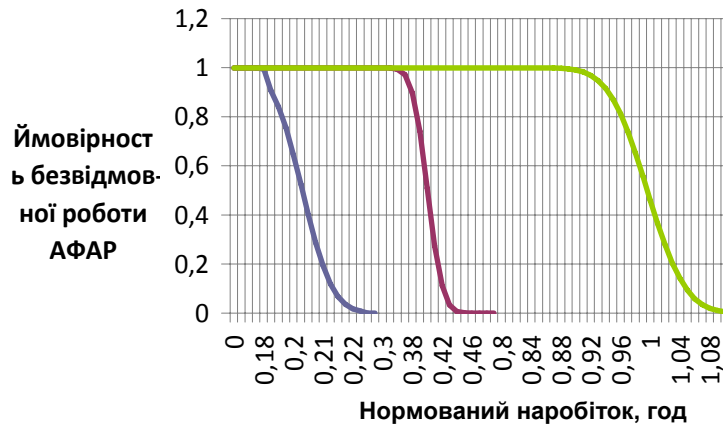


Рис. 3. Графіки залежності ймовірності безвідмовної роботи АФАР від нормованого наробітку t/T_{0_APAR-1} : для АФАР-1 — зеленого кольору; для АФАР-2 — червоного кольору; для АФАР-3 — синього кольору

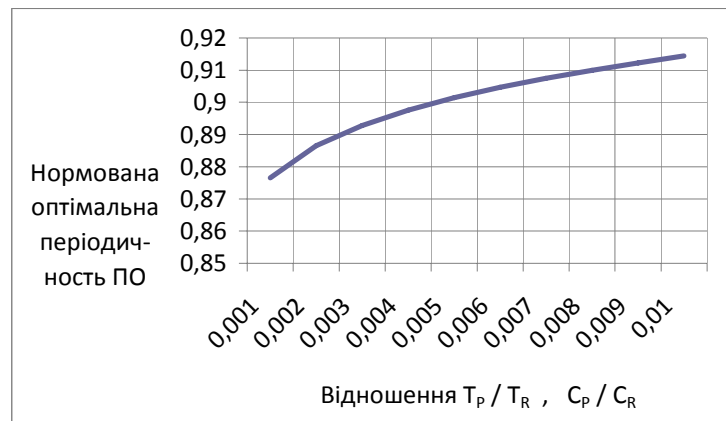


Рис. 4. Графік залежності нормованої оптимальної періодичності профілактичного обслуговування АФАР – opt/T_0_APAR від відношення середнього часу заміни одного відмовив випромінює каналу до середнього часу ремонту АФАР – $P1/R$ (від відносини вартості заміни одного відмовив каналу до вартості ремонту АФАР – $CP1/CR$)

Обговорення отриманих результатів

При збільшенні середнього наробітку на відмову випромінювальних каналів від 50 тис. год до 200 тис. год (у 4 рази):

а) збільшується середній наробіток до відмови передавальної АФАР від 10384 год до 41336 год (у 3,98 разів). Тобто число відсотків (%) збільшення надійності передавальної АФАР відповідає числу % збільшення середнього наробітку на відмову випромінювальних каналів;

б) значення ймовірності безвідмовної роботи АРАР-1 і АРАР-3 при наробітку антенною решітки, відповідної оптимальної періодичності ПО АФАР змінюється в межах від 0,9985 до 0,9987;

в) нормована оптимальна періодичність ПО АФАР за критерієм максимуму КТИ і мінімуму м.о. УЕР змінюється в межах від 0,8707 до 0,8788, тобто змінюється незначно;

г) значення виграшу від оптимізації ПО АФАР за критерієм максимуму КТИ збільшується незначно від 0,698 до 2,56 %;

д) значення виграшу від оптимізації ПО АФАР за критерієм мінімуму м.о. УЕР є значним, змінюючись від 48,7 до 44,5 %.

При зміні ставлення середнього часу заміни одного відмовив випромінює каналу до середнього часу ремонту передавальної АРАР-3 $P1/R$ (відношення вартості заміни одного відмовив каналу до вартості ремонту АРАР-3 $CP1/CR$) від 0,001 до 0,010 нормована оптимальна періодичність профілактичного обслуговування передавальної АРАР-3 opt/T_0_APAR змінюється в межах від 0,8765 до 0,9144.

Значення ймовірності безвідмовної роботи передавальної АРАР-3 змінюються таким чином:

— на інтервалі нормованого наробітку від 0 до 0,875 зменшується від 1,0 до 0,9986;

— на інтервалі від 0,875 до 1,0 зменшується від 0,9986 до 0,461;

— на інтервалі від 0,461 до 1,10 зменшується від 0,461 до 0,0064.

Висновки

1. Значення часу для оптимальної періодичності ПО – opt відповідає значенню часу відмови 10 підрешіток АФАР (при забезпеченні зниження рівня максимальної дальності РЛС на 10 %).

2. Проведення ПО в АФАР в оптимальні терміни може забезпечити значний вигрaш (до 48 %) у витратах в порівнянні з ремонтом АФАР (після відмови 20 підрешіток).

3. Значення оптимальної періодичності ПО передавальної АФАР, враховують, переважно, відмови найбільш численних випромінювальних каналів і слабо враховують відмови модулів вторинних джерел живлення в підрешітках. Облік відмов модулів ВІП призведе до зменшення оптимальної періодичності ПО АФАР.

4. Відмови модулів ВІП можуть мати значний вплив на показники надійності і, відповідно, оптимальну періодичність АФАР.

Надійність модулів ВІП в АФАР повинна бути в десять разів більше надійності випромінювальних каналів, щоб відмова модулів ВІП слабо впливала на показники надійності передавальної АФАР.

5. Результати, отримані для оптимального ПО передавальної АФАР, можуть бути корисні для оцінки оптимальної періодичності ПО також і прийнятно-передавальної АФАР при обліку відмов прийомних каналів АФАР і модулів антенних підрешіток.

6 Проведення регламентних робіт з технічного обслуговування відповідно до оптимальної періодичності ПО АФАР доцільно тільки на ранніх стадіях експлуатації — на етапі гарантійного ТО.

7 На наступних стадіях експлуатації РЛС з АФАР (етапі післягарантійного обслуговування) рекомендується застосовувати метод обслуговування АФАР за фактичним станом [10].

ЛІТЕРАТУРА

1. **Ashok K.** Agrawal. Active Phased Array Design for High Reliability, [Text] / Ashok K. Agrawal, and Eric L. Holzman // *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*. 1999. Vol. 35. NO. 4 - October 1999. Pp. 1204–1211.
2. **Ashok K.** Agrawal. Beamformer Architectures for Active Phased-Array Radar Antennas, [Text] / Ashok K. Agrawal, and Eric L. Holzman // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. 1999. Vol. 47 No. 3 march 1999. Pp. 432–442.
3. **Kostanovskii V. V.** A mathematical model for calculating the reliability of nonreducible phased antenna arrays. *Measurement Techniques*. 2014. T. 57. № 1. Pp. 87–90.
4. **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.
5. **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*, 3/9 (99) 2019, ISSN 1729-3774 DOI:10.15587/17289-061/2019/168525. С. 31–40.
6. **Костановський В. В.,** Мачалин І. А. Разработка и исследование универсальных моделей надежности активной фазированной антенной решетки многофункциональной радиолокационной станции. *Водний транспорт*. 2020. №1.
7. **Костановський В. В.,** Демченко О. В., Козачук О. Д., Мачалин І. О. Модель розрахунку показників надійності АФАР за критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС. *Наукоємні технології*. 2020. Том 45. №1.
8. **Костановський В. В.** Оптимізування технічного обслуговування фазованих антенних решіток. *Математичні машини і системи*. 2015.
9. **Костановський В. В.,** Козачук О. Д. Оптимізація технічного обслуговування групи фазированих антенних решіток з урахуванням випадкових і поступових відмов СВЧ каналів. *Математичні машини і системи*. 2017. №1. С. 122–130.
10. **Kostanovskiy V.,** Kozachuk O., Rusniak I. Development of the algorithm of reliability centered maintenance of phased array antennas. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 1/9 (91) 2018 / УДС.681.3 (07) DOI: 10.15587/1729-4061.2018.123430. С. 20–31.

Костановський В. В., Мачалин І. О.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОФІЛАКТИЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ АКТИВНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РЛС

У статті авторами розглядаються питання визначення показників надійності та технічного обслуговування передавальних активних фазованих антенних решіток (АФАР) багатофункціональних РЛС. Проведено аналіз існуючих моделей надійності та технічного обслуговування АФАР РЛС. Показано, що найбільш цікавими моделями надійності передавальної АФАР є: модель надійності з дворівневою структурною схемою АФАР і модель надійності за критерієм допустимого зниження рівня максимальної дальності РЛС. Серед моделей технічного обслуговування АФАР найцікавішими визначені: модель оптимального профілактичного обслуговування (ПО) АФАР з однорівневою структурою і модель обслуговування АФАР за технічним станом.

Використовуючи результати проведеного аналізу, побудовані моделі надійності і оптимального профілактичного обслуговування передавальної АФАР багато функціональної РЛС. Представлені аналітичні вирази показників надійності дворівневої АФАР: середнього напрацювання до відмови і ймовірностей безвідмовної роботи антеною передавальної підрешітки і передавальної АФАР в цілому. Побудовано аналітичні вирази для критеріїв ефективності оптимального ПО (коефіцієнта технічного використання і математичного очікування питомих експлуатаційних витрат) і критеріїв виграшу від оптимізації ПО. В роботі розглянуто ілюстративний приклад розрахунку показників надійності і оптимального ПО дворівневої АФАР, що включає 6400 СВЧ випромінюючих каналів, скомпонованих в 100 підрешіток по 64 каналу кожен. Визначено середній наробіток до відмови і оптимальні періодичності ПО АФАР для трьох варіантів показників надійності випромінюючих каналів.

Побудовано та проаналізовано графіки ймовірності безвідмовної роботи, коефіцієнта технічного використання і математичного очікування питомих експлуатаційних витрат АФАР. Отримано значення оптимальної періодичності та виграшу від оптимізації. Показано, що результати оптимального ПО доцільно використовувати на початковій стадії експлуатації РЛС з АФАР — на етапі гарантійного обслуговування.

На подальших стадіях експлуатації - етапах післягарантійного обслуговування рекомендується використовувати метод обслуговування АФАР за технічним станом.

Пропоновані авторами моделі можуть бути корисні інженерам і науковим працівникам, які розробляють РЛС з АФАР і працівникам експлуатуючих організацій.

Ключові слова: активна фазована антенна решітка, модель надійності, оптимальне профілактичне обслуговування, обслуговування по фактичному стану.

Kostanoskiy V., Machalin I.

MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION OF PREVENTIVE MAINTENANCE OF TRANSMITTING ACTIVE PHASED ANTENNA ARRANGEMENTS OF MULTIFUNCTIONAL RADARS

In the article, the authors discuss the issues of determining the reliability indicators and maintenance of transmitting active phased array antennas (AFAR) of multifunctional radars. The analysis of the existing models of reliability and maintenance of AFAR radar. It is shown that the most interesting models of transmitting AFAR reliability are the reliability model with a two-level block diagram of the AFAR and the reliability model according to the criterion of permissible reduction of the maximum radar range. Among the AFAR maintenance models, the most interesting ones were identified: the AFAR optimal preventive maintenance (ON) model with a single-level structure and the AFAR maintenance model by technical condition.

Using the results of the analysis, models of reliability and optimal preventive maintenance of a multi-functional radar transmitting AFAR are constructed. The analytical expressions of the reliability indicators of a two-level AFAR are presented: the average operating time to failure and the probabilities of failure-free operation of the antenna transmitting sublattice and the transmitting AFAR as a whole. Analytical expressions are constructed for the criteria for the effectiveness of optimal software (coefficient of technical use and mathematical expectation of specific operating costs) and the criteria for gaining from software optimization. The work considers an illustrative example of calculating the reliability and optimal software of a two-level AFAR, including 6400 microwave emitting channels, arranged in 100 sublattices with 64 channels each. The mean operating time to failure and the optimal periodicity of the AFAR software were determined for three versions of the reliability indicators of the emitting channels. The graphs of the probability of failure-free operation, the coefficient of technical use and the mathematical expectation of the specific operational costs of the AFAR were constructed and analyzed. The values of the optimal periodicity and the gain from optimization are obtained. It is shown that the results of optimal software should be used at the initial stage of operation of radars with AFAR — at the stage of warranty service.

At further stages of operation - the stages of post-warranty service, it is recommended to use the AFAR maintenance method according to the technical condition.

The models proposed by the authors can be useful to engineers and scientists developing radars with AFAR and employees of operating organizations.

Keywords: active phased antenna array, reliability model, optimal preventive maintenance, actual condition maintenance.

Костановский В. В., Мачалин И. А.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЛС

В статье авторами рассматриваются вопросы определения показателей надежности и технического обслуживания передающих активных фазированных антенных решеток (АФАР) многофункциональных РЛС. Проведен анализ существующих моделей надежности и технического обслуживания АФАР РЛС. Показано, что наиболее интересными моделями надежности передающей АФАР являются: модель надежности с двухуровневой структурной схемой АФАР и модель надежности по критерию допустимого снижения уровня максимальной дальности РЛС. Среди моделей технического обслуживания АФАР наиболее интересными определены: модель оптимального профилактического обслуживания (ПО) АФАР с одноуровневой структурой и модель обслуживания АФАР по техническому состоянию.

Используя результаты проведенного анализа, построены модели надежности и оптимального профилактического обслуживания передающей АФАР многофункциональной РЛС. Представлены аналитические выражения показателей надежности двухуровневой АФАР: средней наработки до отказа и вероятностей безотказной работы антенной передающей подрешетки и передающей АФАР в целом. Построены аналитические выражения для критериев эффективности оптимального ПО (коэффициента технического использования и математического ожидания удельных эксплуатационных расходов) и критериев выигрыша от оптимизации ПО. В статье рассмотрен иллюстративный пример расчета показателей надежности и оптимального ПО двухуровневой АФАР, включающей 6400 СВЧ излучающих каналов,

скомпонованных в 100 подрешеток по 64 канала каждый. Определены средняя наработка до отказа и оптимальные периодичности ПО АФАР для трех вариантов показателей надежности излучающих каналов. Построены и проанализированы графики вероятности безотказной работы, коэффициента технического использования и математического ожидания удельных эксплуатационных расходов АФАР. Получены значения оптимальной периодичности и выигрыша от оптимизации. Показано, что результаты оптимального ПО целесообразно использовать на начальной стадии эксплуатации РЛС с АФАР — на этапе гарантийного обслуживания.

На дальнейших стадиях эксплуатации — этапах послегарантийного обслуживания рекомендуется использовать метод обслуживания АФАР по техническому состоянию.

Предлагаемые авторами модели могут быть полезны инженерам и научным работникам, разрабатывающим РЛС с АФАР и работникам эксплуатирующих организаций.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, модель надежности, оптимальное профилактическое обслуживание, обслуживание по фактическому состоянию.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2020 р.

Прийнято до друку 22.06.2020 р.