



УДК 623.6-523.8:623.4.017

В.В. КОСТАНОВСЬКИЙ*

ОПТИМІЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

*Національний авіаційний університет, Київ, Україна

Анотація. Розглянута математична модель оптимально профілактичного обслуговування розподілених структур фазованих антенних решіток. Визначені та досліджені коефіцієнти технічного використання та математичне очікування питомих експлуатаційних затрат для двох типових структур ФАР. Побудована номограма для визначення оптимальної періодичності профілактичного обслуговування структур ФАР.

Ключові слова: оптимізація, профілактичне обслуговування, оптимальна періодичність, коефіцієнт технічного використання, питоми експлуатаційні витрати, надійність, інтенсивність відмов, розподільна структура, фазована антенна решітка, канал надвисокої частоти.

Аннотация. Рассмотрена математическая модель оптимального профилактического обслуживания распределенных структур фазированных антенных решеток. Определены и исследованы коэффициент технического использования и математическое ожидание удельных эксплуатационных расходов для двух типовых структур ФАР. Построена номограмма для определения оптимальной периодичности профилактического обслуживания структур ФАР.

Ключевые слова: оптимизация, профилактическое обслуживание, оптимальная периодичность, коэффициент технического использования, удельные эксплуатационные расходы, надежность, интенсивность отказов, распределенная структура, фазированная антенная решетка, канал сверхвысокой частоты.

Abstract. The mathematical model of optimal preventive maintenance of distributed structures phased antenna arrays. The identified and explored using technical coefficient and the expectation of specific operating costs for two typical structures PAR. Built nomogram for determining the optimal frequency of preventive maintenance structures PAR.

Keywords: optimization, preventative maintenance, optimum frequency, rate technical use, unit operating costs, reliability, failure rate, distribution structure, Phased array, high frequency channel.

1. Вступ. Постановка проблеми

Фазовані антенні решітки (ФАР) мають широке застосування в сучасних радіолокаційних і гідроакустичних станціях. Висока надійність ФАР забезпечується розподіленою структурою з наявністю надмірних (резервних каналів) [1]. Підтримка високої надійності ФАР у процесі експлуатації забезпечується оптимальною системою технічного обслуговування (ТО) і ремонту.

2. Аналіз досліджень та публікацій

Вирішенню проблеми оптимізації технічного обслуговування технічних систем присвячена велика кількість робіт відомих авторів [2–6]. Однак питання оптимізації ТО резервних структур типу ФАР вивчені недостатньо.

Мета роботи:

- побудувати математичну модель оптимального профілактичного обслуговування розподілених структур з ФАР і визначити основні техніко-економічні характеристики і критерії оптимізації профілактичного обслуговування (ПО);
- визначити і дослідити техніко-економічні характеристики і вигоди від оптимізації ПО для двох типових розподілених структур ФАР.

3. Постановка задачі

Слід зазначити, що профілактичне обслуговування (профілактика) ФАР проводиться з періодичністю, при якій передбачається повне оновлення або заміна всіх елементів ФАР. Після ПО інтенсивність відмов ФАР падає до нуля. Періодичність ПО не залежить від числа відмов, які сталися в перерві між профілактиками, а аварійний ремонт (АР) не впливає на інтенсивність відмов ФАР [5, 6].

При оптимізації ПО використовуються або технічна характеристика ефективності – коефіцієнт технічного використання (КТВ) $-K_B(\tau)$, або відповідна йому економічна характеристика ефективності – питомі експлуатаційні витрати (ПЕЗ) $-C(\tau)$. Оптимізація ПО проводиться за критерієм максимуму КТВ $-K_B(\tau)$ (пряма задача) або за критерієм мінімуму математичного очікування ПЕЗ $-C(\tau)$ (зворотна задача) [5, 6].

4. Вирішення задачі

4.1. Обґрунтування математичної моделі оптимізації ПО розподільних структур ФАР

Позначимо τ – періодичність ПО ФАР, τ_n і c_n – відповідно тривалість та вартість проведення ПО ФАР, τ_p і c_p – відповідно тривалість та вартість збитку під час ФАР, $P_{\text{ФАР}}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи ФАР.

Тоді аналітичний вираз для КТВ однотипових ФАР має вигляд

$$K_B(\tau) = \frac{\tau}{\tau + \tau_n - \tau_p \ln P_{\text{ФАР}}(\tau)}. \quad (1)$$

Аналітичний вираз математичного очікування ПЕЗ для однотипових ФАР:

$$M[C(\tau)] = \frac{c_n - c_p \ln P_{\text{ФАР}}(\tau)}{\tau}, \quad (2)$$

де $\tau_n = \tau_{n1} \{1 + N[1 - P_K(\tau)]\}$, $c_n = c_{n1} \{1 + N[1 - P_K(\tau)]\}$, тут τ_{n1} , c_{n1} – відповідно тривалість та вартість ПО одного НВЧ-каналу розподільної структури ФАР, N – число НВЧ-каналів розподільної структури ФАР. Оптимальна періодичність $\tau_{\text{опт}}$ у прямій та зворотній задачах оптимізації ПО ФАР визначається за узагальненим трансцендентним рівнянням:

$$S(\tau) = \varepsilon, \quad \text{де } S(\tau) = \frac{\ln[P_{\text{ФАР}}(\tau)] + \tau \Lambda_{\text{ФАР}}(\tau)}{N[1 - P_K(\tau) - \tau f_k(\tau)]}, \quad (3)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \tau_{n1} & \text{– під час оптимізації за критерієм } \max KTB, \\ \tau_p & \\ c_{n1} & \text{– під час оптимізації за критерієм } \min \text{ м.о. ПЕЗ,} \\ c_p & \end{cases}$$

де $\Lambda_{\text{ФАР}}(\tau)$ – інтенсивність відмов ФАР;

$P_k(\tau)$, $f(\tau)$ – імовірність та щільність розподілу часу безвідмовної роботи НВЧ-каналу розподільної ФАР.

За експоненціальним законом розподілу часу безвідмовної роботи НВЧ-каналу розподільної структури ФАР

$$P_k(\tau) = \exp(-\lambda_k \tau), f_k(\tau) = \lambda_k \exp(-\lambda_k \tau). \quad (4)$$

Аналітичний вираз для ймовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов ФАР має вигляд

$$P_{\text{ФАР}}(\tau) = \sum_{j=0}^m C_N^j [P_k(\tau)]^{N-j} [1 - P_k(\tau)]^j, \quad (5)$$

$$\Lambda_{\text{ФАР}}(\tau) = \frac{n \lambda_k C_N^m [1 - P_k(\tau)]^m [P_k(\tau)]^n}{P_{\text{ФАР}}(\tau)}. \quad (6)$$

Ефективність оптимізації ПО ФАР оцінюється виграшами від оптимізації:

- виграш за КТВ:

$$W[K_n(\tau_{\text{опт}})] = \left\{ 1 - \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} K_n(\tau)}{K_n(\tau_{\text{опт}})} \right\} \times 100\%; \quad (7)$$

- виграш у математичному очікуванні ПЕЗ:

$$W\{M[C(\tau_{\text{опт}})]\} = \left\{ 1 - \frac{M[C(\tau_{\text{опт}})]}{\lim_{n \rightarrow \infty} M[C(\tau)]} \right\} \times 100\%. \quad (8)$$

4.2. Дослідження моделі оптимізації ПО двох типів структур ФАР

На рис. 1 представлена номограма для визначення оптимальної періодичності профілактичного обслуговування двох типових розподільних структур ФАР.

- 1-ша структура ФАР – загальне число НВЧ-каналів $N = 256$, число резервних НВЧ-каналів $m = 12$;
- 2-га структура ФАР – загальне число НВЧ-каналів $N = 256$, число резервних НВЧ-каналів $m = 25$.

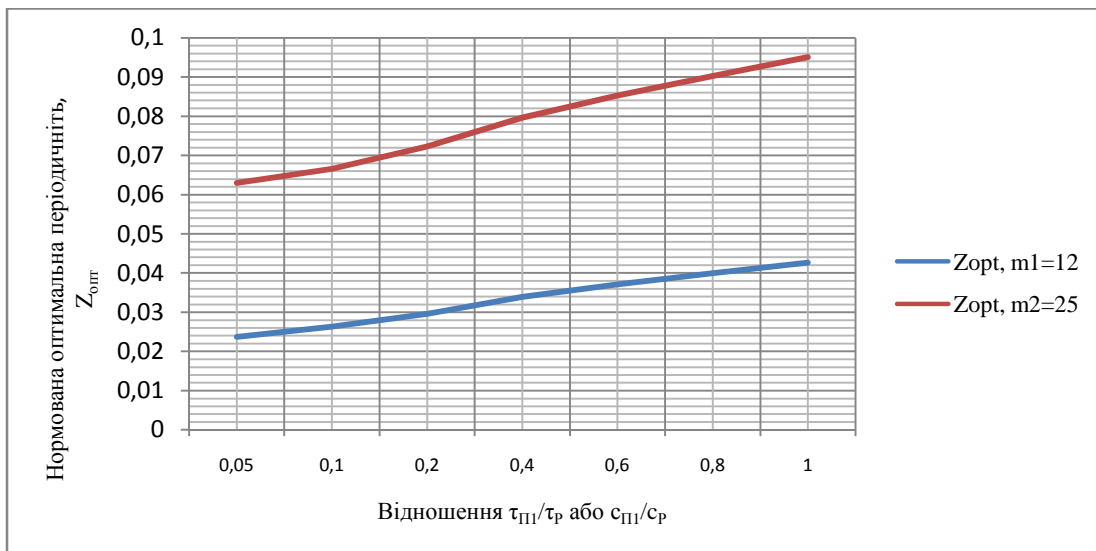


Рис. 1. Номограма для визначення нормованої оптимальної періодичності ПО ФАР – $Z_{\text{опт}} = \frac{\tau_{\text{ом}}}{T_{0k}}$

в залежності від відношення $\frac{\tau_{п1}}{\tau_{р}} \left(\frac{c_{п1}}{c_{р}} \right)$ (синя лінія – 1-ша структура ФАР,
червона лінія – 2-га структура ФАР)

На рис. 2 представлена залежність коефіцієнта технічного використання $K_B(Z)$ від нормованої періодичності профілактичного обслуговування $Z = \frac{\tau}{T_{0k}}$ для двох типів структур ФАР.

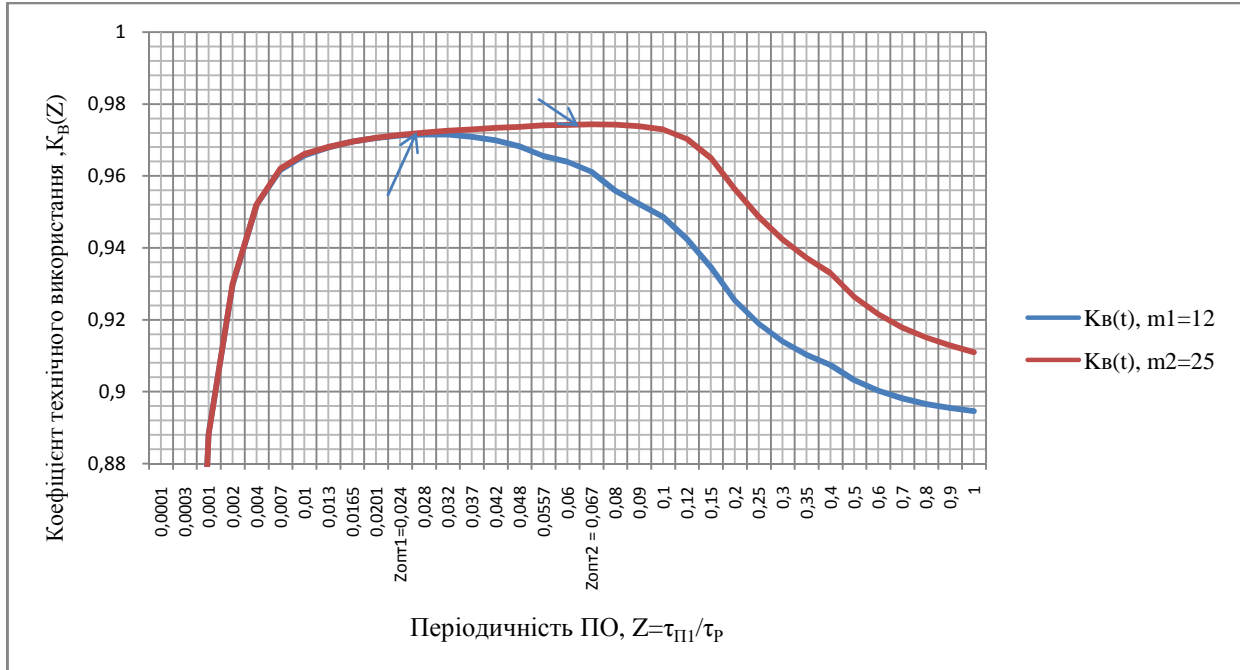


Рис. 2. Залежність $K_B(z)$ за $\tau_{PI} / \tau_P = 0,015$, $\lambda_k = 100 \times 10^{-6}$ 1/год., $\tau_P = 10$ год.
(синя лінія – 1-а структура ФАР, червона лінія – 2-а структура ФАР)

Стрілками позначене оптимальне значення КТВ. Як видно з рис. 2, графік залежності $K_B(z)$ характеризується плоскою вершиною, що дозволяє проводити профілактичне обслуговування ФАР не тільки в оптимальні строки, але і близькі до оптимальних (квазі-оптимальні строки). Зі збільшенням кількості резервних каналів у розподільній структурі ФАР (типова структура 2, $m = 25$) ширина вершини КТВ розширяється вдвоє, тобто діапазон значень квазіоптимальних періодичностей збільшується вдвоє (порівняно із типовою структурою 1, $m = 12$). Максимальне значення КТВ для другої типової структури ФАР набагато вище максимального значення для першої структури ФАР.

На рис. 3 представлена залежність коефіцієнта технічного використання ФАР $K_B(z)$ від нормованої періодичності ПО – $Z = \frac{\tau}{T_{0k}}$ за різними значеннями відношення

$$\frac{\tau_{n1}}{\tau_P}$$

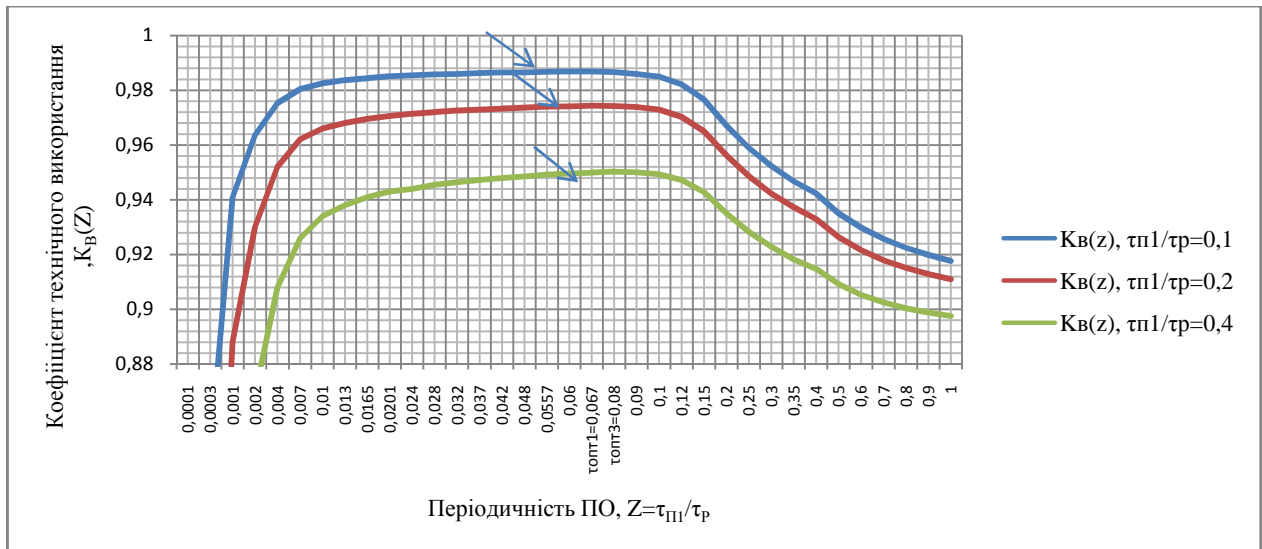


Рис. 3. Залежність $K_B(Z)$ за різними значеннями відношення $\frac{\tau_{n1}}{\tau_p}$ ($\tau_{n1} = 1$ год. – синя лінія, $\tau_{n1} = 2$ год. – червона лінія, $\tau_{n1} = 4$ год. – зелена лінія; 2-а структура ФАР; $\lambda_k = 100 \times 10^{-6} / \text{год.}$, $\tau_p = 10$ год.); стрілками позначене максимальне значення КТВ

Як видно з рис. 3, зі збільшенням відношення $\frac{\tau_{n1}}{\tau_p}$ максимальне значення КТВ зменшується, а значення оптимальної періодичності ПО ФАР збільшується.

На рис. 4 представлена залежність математичного очікування ПЕЗ від нормованої періодичності профілактичного обслуговування $Z = \frac{\tau}{T_{0k}}$ для двох типів розподільних структур ФАР.

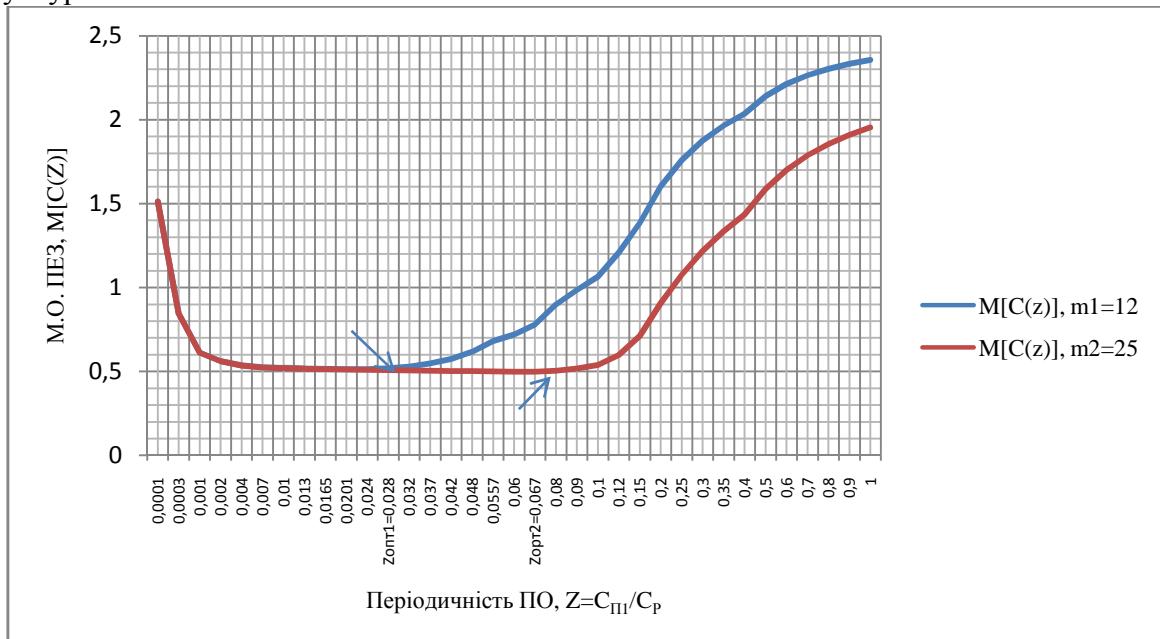


Рис. 4. Залежність $M[C(Z)]$ за $c_{n1} = 1,5$ у.о., $\lambda_k = 100 \times 10^{-6} / \text{год.}$, $c_p = 100$ у.о. (синя лінія – 1-ша структура ФАР, червона лінія – 2-га структура ФАР), стрілками позначене мінімальне значення математичного очікування ПЕЗ

Як видно із рис. 4, графік залежності для математичного очікування ПЕЗ має широку чашоподібну форму, що дозволяє проводити профілактичне обслуговування ФАР не тільки в оптимальні строки, але й у строки, близькі до оптимальних (квазіоптимальні строки). Мінімальні значення математичного очікування ПЕЗ для обох типових структур ФАР практично співпадають.

На рис. 5 представлена залежність математичного очікування ПЕЗ від нормованої періодичності ПО $Z = \frac{\tau}{T_{ok}}$ за різними значеннями відношення $\frac{c_{п1}}{c_p}$.

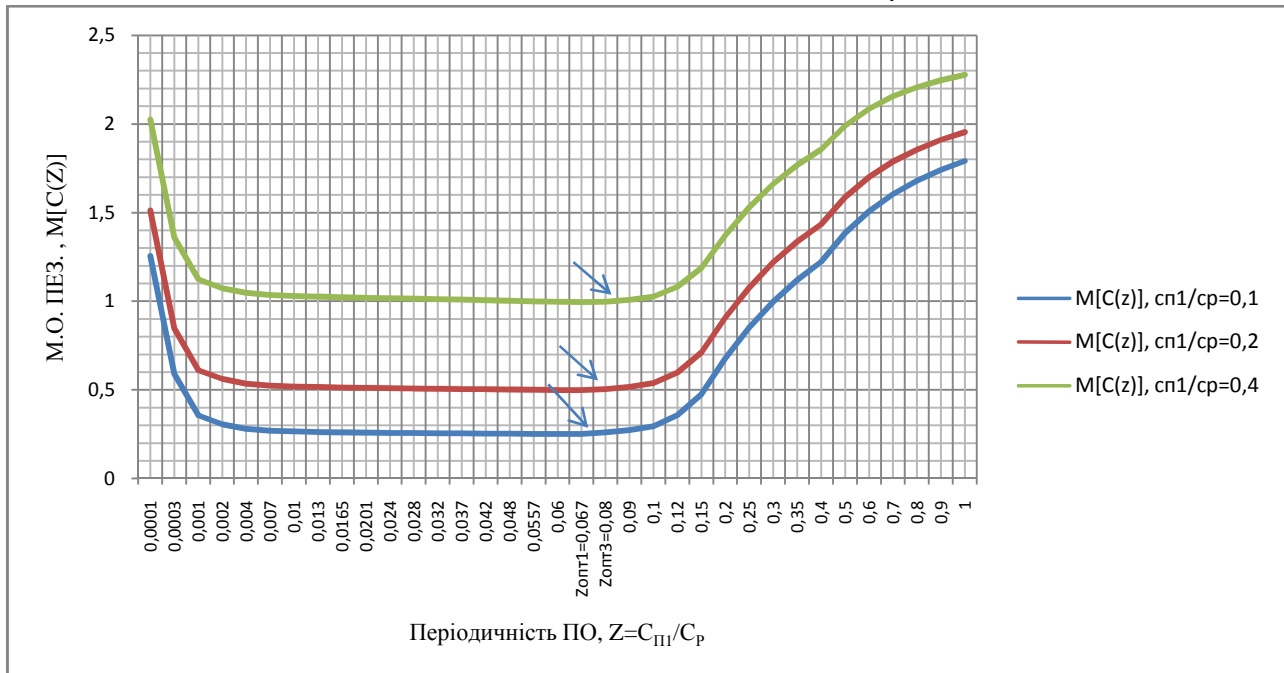


Рис. 5. Залежність $M[C(Z)]$ за $\lambda_k = 100 \times 10^{-6} 1/\text{год.}$, 2-а структура ФАР ($N = 256, m = 25$), $c_{п1} = 100$ у.о. (синя лінія – $c_{п1} = 10$ у.о., червона лінія – $c_{п1} = 20$ у.о., зелена лінія – $c_{п1} = 40$ у.о.), стрілками позначене мінімальне значення м.о. ПЕЗ

Як видно з рис. 5, зі збільшенням відношення $\frac{c_{п1}}{c_p}$ мінімальні значення м.о. ПЕЗ і значення оптимальних періодичностей ПО ФАР збільшуються.

Таблиця 1. Виграш від оптимізації коефіцієнта технічного використання $W[K_B(\tau_{opt})]$ для двох структур ФАР за різними значеннями $\frac{\tau_{п1}}{\tau_p}$

$\tau_{п1}/\tau_p$	$\tau_{п1}/\tau_p = 0,015$ ($\tau_p = 10$ год.)	$\tau_{п1}/\tau_p = 0,1$ ($\tau_p = 10$ год.)
Тип структури ФАР		
1-а структура ($N = 256, m = 12, \lambda_k = 100 \times 10^{-6} 1/\text{год.}$)	16,7 %	15,6 %
2-а структура ($N = 256, m = 25, \lambda_k = 100 \times 10^{-6} 1/\text{год.}$)	13,9 %	12,95 %

Таблиця 2. Виграш від оптимізації коефіцієнта ПЕЗ $W\{M[C(\tau_{\text{опт}})]\}$ для двох структур ФАР за різними значеннями $c_{п1}/c_p$

$c_{п1}/c_p$	$c_{п1}/c_p = 0,015$ ($c_p = 100$ у. о.)	$c_{п1}/c_p = 0,1$ ($c_p = 100$ у. о.)
Тип структури ФАР		
1 -а структура ($N = 256, m = 12, \lambda_K = 100 \times 10^{-6}$ 1/год.)	97,9 %	88 %
2 -а структура ($N = 256, m = 25, \lambda_K = 100 \times 10^{-6}$ 1/год.)	97,6 %	85,97 %

5. Висновки

У статті розроблено модель оптимального ПО розподільної структури ФАР. Отримано аналітичні залежності для техніко-економічних характеристик ПО ФАР – КТВ і м.о. ПЕЗ. Визначено критерії оптимізації ПО ФАР – по максимуму КТВ і по мінімуму м.о. ПЕЗ. Визначені критерії від оптимізації. Як приклад побудовані і досліджені моделі оптимізації ПО двох типових розподілених структур ФАР. Розроблена номограма для визначення оптимальної періодичності ПО двох типових структур ФАР.

Отримані результати можуть бути використані під час розробки регламентів оптимального технічного обслуговування радіолокаційних і гідроакустичних станцій з ФАР.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Костановський В.В. Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, які враховують раптові та поступові відмови модулів надвисоких частот / В.В. Костановський // Математичні машини і системи. – 2014. – № 2. – С. 142 – 150.
2. Барлоу Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Советское радио, 1969. – 256 с.
3. Барзилович Е.Ю. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович, В.А. Каштанов. – М.: Советское радио, 1971. – 273 с.
4. Надежность и эффективность в технике: справочник в 10 т. / Под ред. В.И. Кузнецова, Е.Ю. Барзиловича. – Москва: Машиностроение, 1990. – Т. 8: Эксплуатация и ремонт. – 320 с.
5. Игнатов В.А. Статистическая оптимизация качества функционирования электронных систем / Игнатов В.А., Маньшин Г.Г., Трайнев В.А. – Москва: Энергия, 1974. – С. 133 – 151.
6. Игнатов В.А. Элементы теории оптимального обслуживания технических изделий / Игнатов В.А., Маньшин Г.Г., Костановский В.В. – Минск: Наука и техника, 1974. – С. 48 – 92.

Стаття надійшла до редакції 12.11.2014