

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ГРУППЫ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С УЧЕТОМ ВНЕЗАПНЫХ И ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗОВ СВЧ КАНАЛОВ

*НИИ «Квант» Государственного концерна «Укроборонпром», Киев, Украина

Анотація. У статті досліджена модель оптимізації групового технічного обслуговування декількох ФАР, що входять в антенний пост РЛС. Отримано аналітичні вирази для коефіцієнта технічного використання і математичного очікування питомих експлуатаційних витрат групи ФАР. Досліджено моделі оптимізації технічного обслуговування групи ФАР при дифузійному немонотонному і експоненціальному розподілах часу безвідмовної роботи каналів ФАР.

Ключові слова: технічне обслуговування, ФАР, періодичність профілактичного обслуговування, експоненціальний розподіл, дифузійний немонотонний розподіл, середнє напрацювання до відмови, інтенсивність відмов.

Аннотация. В статье исследована модель оптимизации группового технического обслуживания нескольких ФАР, входящих в антенный пост РЛС. Получены аналитические выражения для коэффициента технического использования и математического ожидания удельных эксплуатационных расходов группы ФАР. Исследованы модели оптимизации профилактического обслуживания группы ФАР при диффузионном немонотонном и экспоненциальном распределениях времени безотказной работы каналов ФАР.

Ключевые слова: техническое обслуживание, ФАР, периодичность профилактического обслуживания, экспоненциальное распределение, диффузионное немонотонное распределение, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов.

Abstract. The paper studies the optimization model of the group maintenance of several phased antenna arrays, within the radar antenna post. The analytical expressions for the technical utilization rate and the expectation of specific operating costs for the group of phased antenna array. Abstract model optimize maintenance of phased antenna array group in the diffusion and non-monotonous exponential distribution uptime of phased antenna array channels.

Keywords: maintenance, phased antenna array, frequency of preventive maintenance, the exponential distribution, diffusion nonmonotonic distribution, the average time to failure, the failure rate.

1. Введение

Теоретической основой для построения регламента оптимального технического обслуживания (ТО) фазированных антенных решеток (ФАР) радиолокационной станции (РЛС), расположенных в антенном посту, являются математические модели оптимизации профилактического обслуживания (ПО) электронных устройств. Проблема оптимизации ПО электронных устройств рассматривалась профессором В.А. Игнатовым в работе [1]. Традиционные модели оптимального технического обслуживания электронных устройств и распределенных структур ФАР рассматривались авторами в работах [2, 3].

В данной статье рассматривается задача оптимизации профилактического обслуживания группы из нескольких ФАР, входящих в антенный пост РЛС, при немонотонном диффузионном и экспоненциальном распределениях времени безотказной работы каналов ФАР.

2. Постановка задачи

При профилактическом обслуживании группы из нескольких ФАР, входящих в антенный пост РЛС, групповая профилактика проводится с периодичностью τ , при которой предусматривается полное обновление (замена) всех отказавших СВЧ приемно-передающих и приемных каналов во всех распределенных структурах ФАР. Основными технико-экономическими характеристиками ПО группы ФАР являются периодичность ПО – τ , коэффициент технического использования (КТИ) группы ФАР – $K_{И_ГР}(\tau)$ и математическое ожидание удельных эксплуатационных расходов (м.о. УЭР) – $M_{ГР}[C(\tau)]$. В процессе оптимизации ПО группы ФАР определяется оптимальная периодичность $\tau_{опт_гп}$ группового ПО по критерию максимума КТИ или по критерию минимума м.о. УЭР.

3. Математические модели оптимизации группового ПО ФАР

Обозначим:

τ – периодичность ПО группы ФАР;

τ_{ni} и c_{ni} – соответственно, продолжительность профилактики и стоимость проведения ПО i -ой структуры ФАР;

τ_{pi} и c_{pi} – продолжительность ремонта и стоимость ущерба при аварийном ремонте i -ой структуры ФАР;

$P_{Ai}(\tau)$ – вероятность безотказной работы i -ой структуры ФАР, $i = \overline{1, n}$.

Тогда коэффициент технического использования группы ФАР определяется по формуле

$$K_{И_ГР}(\tau) = \frac{\tau}{\tau + \sum_{i=1}^n \tau_{ni} - \sum_{i=1}^n \tau_{pi} \ln P_{Ai}(\tau)}, \quad (1)$$

где

$$P_A(\tau) = \sum_{j=0}^m C_N^j [P_K(\tau)]^{N-j} [1 - P_K(\tau)]^j - \quad (2)$$

вероятность безотказной работы распределенной структуры ФАР.

Для удобства выполнения вычислений формулу (2) можно записать в рекуррентной форме:

$$P_A(\tau; N/m) = P_A(\tau; N/(m-1)) + C_N^m [P_K(\tau)]^{N-m} [1 - P_K(\tau)]^m, \quad (3)$$

$$P_{Ai}(\tau), \quad i = \overline{1, n},$$

где n – число распределенных структур ФАР в группе;

$$\tau_{ni} = \tau_{n0i} \{1 + N_i [1 - P_{ki}(\tau)]\}; \quad (4)$$

τ_{ni} – продолжительность ПО i -ой распределенной структуры ФАР;

τ_{n0i} – продолжительность ПО одного СВЧ канала i -ой структуры ФАР;

τ_{pi} – продолжительность аварийного ремонта i -ой структуры ФАР;

$P_{ki}(\tau)$, $i = \overline{1, n}$ – вероятность безотказной работы канала СВЧ i -ой структуры ФАР.

Математическое ожидание удельных эксплуатационных расходов (м.о. УЭР):

$$M_{ГР}[C(\tau)] = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ni} - \sum_{i=1}^n c_{pi} \ln P_{Ai}(\tau)}{\tau}, \quad (5)$$

где $c_{ni} = c_{n0i} \{1 + N_i [1 - P_{ki}(\tau)]\}$ – стоимость проведения ПО i -ой структуры ФАР;

c_{n0i} – стоимость проведения ПО одного канала СВЧ i -ой структуры ФАР;

τ_{pi} – стоимость ущерба от аварии (с учетом стоимости проведения аварийного ремонта) i -ой структуры ФАР.

При оптимизации по критерию максимума коэффициента технического использования оптимальная периодичность ПО группы ФАР одного антенного поста определяется из решения обобщенного трансцендентного уравнения:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \tau_{n0i} \{1 + N_i [1 - P_{ki}(\tau) - \tau \times f_{ki}(\tau)]\}}{\sum_{i=1}^n \tau_{pi} [\ln P_{Ai}(\tau) + \tau \times \Lambda_{Ai}(\tau)]} = 1. \quad (6)$$

При оптимизации по критерию минимума м.о. удельных эксплуатационных расходов оптимальная периодичность ПО группы ФАР одного антенного поста определяется из решения обобщенного трансцендентного уравнения:

$$\frac{\sum_{i=1}^n c_{n0i} \{1 + N_i [1 - P_{ki}(\tau) - \tau \times f_{ki}(\tau)]\}}{\sum_{i=1}^n c_{pi} [\ln P_{Ai}(\tau) + \tau \times \Lambda_{Ai}(\tau)]} = 1. \quad (7)$$

В данной работе рассматривается процедура определения оптимальной периодичности ПО группы ФАР для двух типов распределения времени безотказной работы СВЧ каналов ФАР при:

– экспоненциальном распределении, учитывающем только внезапные отказы электрорадиоэлементов;

– немонотонном диффузионном распределении времени, учитывающем как внезапные, так и постепенные отказы электрорадиоэлементов [4].

Вероятность безотказной работы СВЧ канала i -ой структуры ФАР при экспоненциальном распределении ВБР определяется по формуле

$$P_{ki}(\tau) = \text{EXP}(-\lambda_{ki}\tau), \quad (8)$$

где λ_{ki} – интенсивность СВЧ канала i -ой структуры ФАР.

Вероятность безотказной работы СВЧ канала i -ой структуры ФАР при диффузионном немонотонном распределении ВБР определяется по формуле

$$P_{ki}(\tau) = \Phi\left(\frac{T_{0i} - \tau}{v_i \sqrt{T_{0i}\tau}}\right) - \text{EXP}\left(\frac{2}{v_i^2}\right) \times \Phi\left(-\frac{T_{0i} + \tau}{v_i \sqrt{T_{0i}\tau}}\right), \quad (9)$$

где T_0 – среднее время безотказной работы канала СВЧ i -ой структуры ФАР;

v_i – коэффициент вариации наработки на отказ канала СВЧ i -ой структуры ФАР.

В формулах (6, 7) используются:

$f_{ki}(\tau)$ – плотность распределения вероятностей безотказной работы СВЧ канала i -ой структуры ФАР;

$$\Lambda_{Ai}(\tau) = \frac{f_{Ai}(\tau)}{P_{Ai}(\tau)} - \text{интенсивность отказов } i\text{-ой структуры ФАР};$$

$f_{Ai}(\tau)$ – плотность распределения вероятностей безотказной работы i -ой структуры ФАР.

Плотность распределения вероятностей безотказной работы i -ой структуры ФАР определяется по формуле

$$f_{Ai}(\tau) = f_{ki}(\tau) \sum_{j=0}^m C_N^j \left\langle [P_{ki}(\tau)]^{N-j-1} [1 - P_{ki}(\tau)]^{j-1} \left\{ (N-m)[1 - P_{ki}(\tau)] - jP_{ki}(\tau) \right\} \right\rangle \quad (10)$$

в рекуррентной форме:

$$f_{Ai}(\tau, N/m) = f_{Ai}(\tau, N/(m-1)) + C_N^m \left\langle [P_{ki}(\tau)]^{N-m-1} [1 - P_{ki}(\tau)]^{m-1} \left\{ (N-m)[1 - P_{ki}(\tau)] - mP_{ki}(\tau) \right\} \right\rangle.$$

Для экспоненциального распределения времени безотказной работы:

$$f_{ki}(\tau) = \lambda_{ki} \exp(-\lambda_{ki}\tau). \quad (11)$$

Для диффузионного немонотонного распределения безотказной работы [4]:

$$f_{ki}(\tau) = \frac{\sqrt{T_{0i}}}{\nu * \tau \sqrt{2\pi * \tau}} \exp \left[-\frac{(\tau - T_{0i})^2}{2\nu^2 * \tau * T_{0i}} \right]. \quad (12)$$

4. Пример оптимизации профилактического обслуживания антенного поста РЛС с одной приемной и одной передающей ФАР

4.1. Исходные данные примера представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные примера

Тип ФАР	Общее количество каналов в ФАР	Количество основных каналов в ФАР	Количество резервных каналов в ФАР	Средняя наработка на отказ канала ФАР, ч	Продолжительность профилактического обслуживания ФАР, ч	Продолжительность ремонта ФАР, ч	Стоимость профилактического обслуживания ФАР, у.е./год.*изделие)	Стоимость ущерба при отказе и аварийном ремонте ФАР, у.е./год.*изделие)
Приемная ФАР	61	56	5	5000	0,5	3	40	500
Передающая ФАР	61	55	6	2500	0,5	3	60	700

4.2. В процессе оптимизации ПО необходимо:

– определить оптимальные значения периодичности профилактического обслуживания группы ФАР – τ_{opt} , максимизирующие КТИ и минимизирующие м.о. УЭР;

– выполнить сравнение полученных результатов при использовании экспоненциального и DN-распределения для ВБР каналов ФАР.

4.3. Решение примера

Вероятность безотказной работы приемной ФАР определяется по формуле

$$P_{A1}(\tau) = \sum_{j=0}^5 C_{61}^j [P_{\kappa 1}(\tau)]^{61-j} [1 - P_{\kappa 1}(\tau)]^j. \quad (13)$$

Вероятность безотказной работы передающей ФАР определяется по формуле

$$P_{A2}(\tau) = \sum_{j=0}^6 C_{61}^j [P_{\kappa 2}(\tau)]^{61-j} [1 - P_{\kappa 2}(\tau)]^j. \quad (14)$$

Плотность распределения вероятности безотказной работы приемной ФАР определяется по рекуррентной формуле (10):

$$f_{A1}(\tau, 61/5) = f_{A1}(\tau, 61/4) + C_{61}^5 \left\langle [P_{\kappa 1}(\tau)]^{55} [1 - P_{\kappa 1}(\tau)]^4 \{56[1 - P_{\kappa 1}(\tau)] - 5P_{\kappa 1}(\tau)\} \right\rangle. \quad (15)$$

Плотность распределения вероятности безотказной работы передающей ФАР определяется по формуле

$$f_{A2}(\tau, 61/6) = f_{A2}(\tau, 61/5) + C_{61}^6 \left\langle [P_{\kappa 2}(\tau)]^{54} [1 - P_{\kappa 2}(\tau)]^5 \{55[1 - P_{\kappa 2}(\tau)] - 6P_{\kappa 2}(\tau)\} \right\rangle. \quad (16)$$

При использовании формулы (6) для оптимизации по критерию максимума КТИ вначале определялись оптимальные периодичности ПО для приемной и передающей ФАР, а затем оптимальная периодичность группового ПО для антенного поста в целом. На рис. 1 и 2 представлены зависимости КТИ от периодичности ПО для приемной ФАР, передающей ФАР и группы из двух ФАР для экспоненциального распределения (рис. 1) и диффузионного немонотонного распределения (рис. 2) времени безотказной работы каналов ФАР.

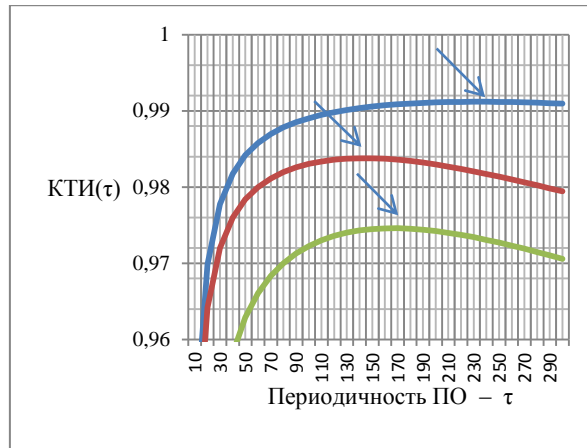


Рис. 1. Зависимость КТИ от периодичности ПО для приемной ФАР (верхняя кривая – $\tau_{1opt}=240$ ч), передающей ФАР (средняя кривая – $\tau_{2opt}=140$ ч) и группы ФАР (нижняя кривая – $\tau_{гр,opt}=170$ ч) для экспоненциального распределения ВБР СВЧ каналов ФАР

При использовании формулы (7) для оптимизации по критерию минимума м.о. УЭР вначале определялись оптимальные периодичности ПО для приемной и передающей ФАР, а затем оптимальная периодичность группового ПО для антенного поста в целом. На рис. 3 и 4 представлены зависимости м.о. УЭР от периодичности ПО для приемной ФАР, передающей ФАР и группы из двух ФАР для экспоненциального распределения (рис. 3) и

диффузионного немонотонного распределения (рис. 4) времени безотказной работы каналов ФАР.

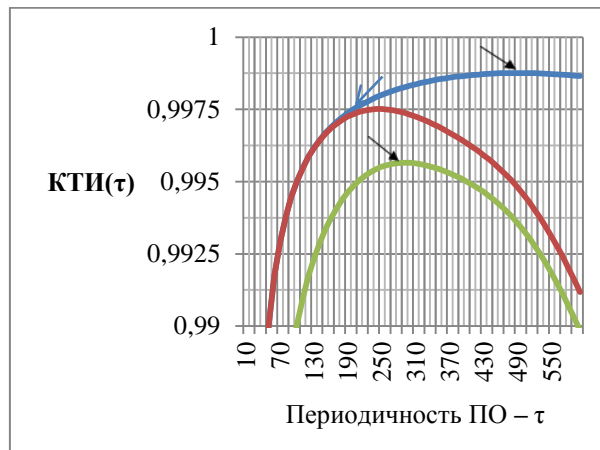


Рис. 2. Зависимость КТИ от периодичности ПО для приемной ФАР (верхняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=490$ ч), передающей ФАР (средняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=250$ ч) и группы ФАР (нижняя кривая – $\tau_{\text{гр.опт}}=300$ ч) для диффузионного немонотонного распределения ВБР СВЧ каналов ФАР

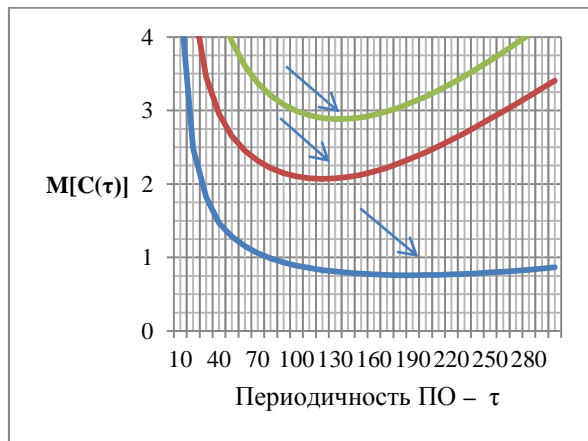


Рис. 3. Зависимость м.о. УЭР от периодичности ПО для приемной ФАР (нижняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=190$ ч), для передающей ФАР (средняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=120$ ч) и для группы ФАР (верхняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=130$ ч) при экспоненциальном распределении ВБР каналов ФАР

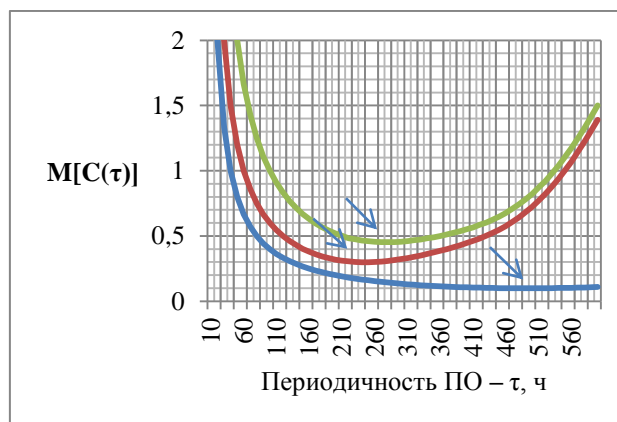


Рис. 4. Зависимость м.о. УЭР от периодичности ПО для приемной ФАР (нижняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=490$ ч), для передающей ФАР (средняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=250$ ч) и для группы ФАР (верхняя кривая – $\tau_{\text{гр.опт}}=280$ ч) при диффузионном немонотонном распределении ВБР СВЧ каналов ФАР

На рис. 5 представлена сравнительная характеристика графиков КТИ приемной ФАР при экспоненциальном и диффузионном немонотонном распределениях ВБР СВЧ каналов ФАР.

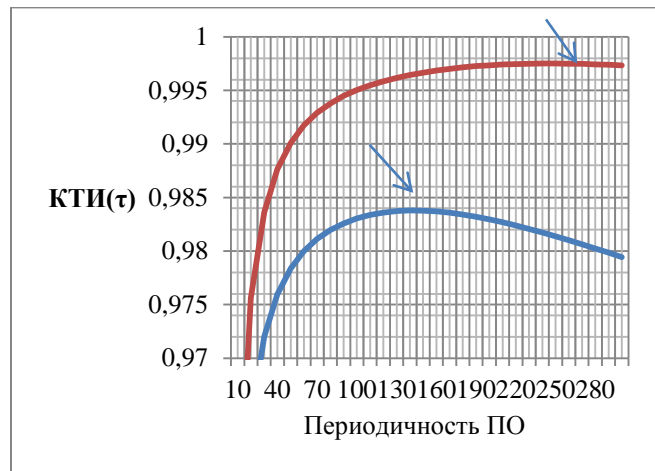


Рис. 5. Зависимость КТИ от периодичности ПО для приемной ФАР при экспоненциальном (нижняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=150$ ч) и диффузионном немонотонном распределениях (верхняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=250$ ч) ВБР СВЧ каналов ФАР

На рис. 6 представлена сравнительная характеристика графиков м.о. УЭР приемной ФАР при экспоненциальном и диффузионном немонотонном распределениях ВБР СВЧ каналов ФАР

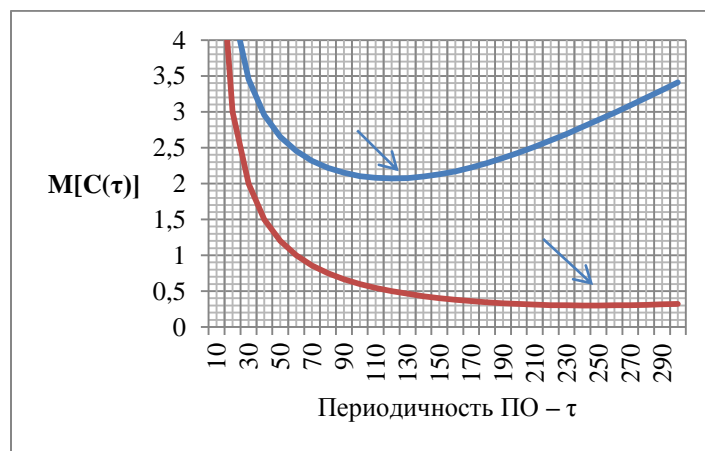


Рис. 6. Зависимость м.о. УЭР от периодичности ПО для передающей ФАР для ЭР (верхняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=120$ ч) и ДНР (нижняя кривая – $\tau_{\text{опт}}=250$ ч) ВБР СВЧ каналов ФАР

Анализ графиков на рис. 1 – 6 показывает, что значения оптимальной периодичности ПО – $\tau_{\text{опт}}$ при использовании диффузионного немонотонного распределения для ВБР СВЧ каналов ФАР в 1,6 – 2,1 раз больше, чем значения $\tau_{\text{опт}}$ при использовании экспоненциального распределения.

На рис. 7 представлена номограмма для определения нормированной оптимальной периодичности трех модификаций распределенных структур ФАР (61/4, 61/5, 61/6) при экспоненциальном распределении ВБР каналов ФАР в зависимости от логарифма отношения продолжительности ПО одного канала ФАР к продолжительности АР ФАР или логарифма отношения стоимости ПО одного канала ФАР к стоимости ущерба от внезапного отказа и ущерба от АР ФАР.

Номограмма является универсальной и позволяет определить оптимальную периодичность в широком диапазоне от минимального значения отношения $\ln(t_r / t_p) = 0$ ($t_r / t_p = 1$) до максимального значения $\ln(t_r / t_p) = 3$ ($t_r / t_p = 1000$). Из номограммы следует, что значения нормированной оптимальной периодичности Z_{opt} с ростом логарифма отношения $\ln(t_r / t_p)$ или $\ln(c_r / c_p)$ постепенно уменьшаются.

Примечание 1. При использовании экспоненциального распределения для ВБР каналов ФАР область определения нормированной оптимальной периодичности ПО – $Z_{opt} = \tau_{opt.} / T_{0кан.}$ существует в широком диапазоне значений от 0,01 до 0,105.

Примечание 2. При использовании диффузионного немонотонного распределения ВБР каналов ФАР область определения нормированной оптимальной периодичности ПО – $Z_{opt} = \tau_{opt.} / T_{0кан.}$ существует только в узком диапазоне в пределах от 0,09791 до 0,09797.

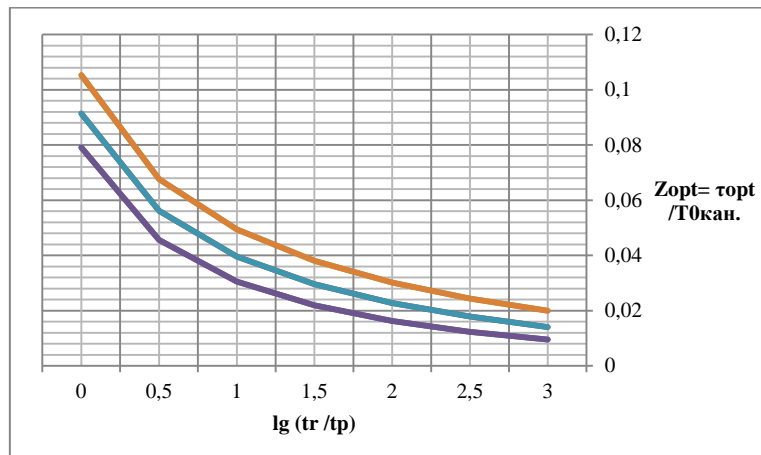


Рис. 7. Номограмма для определения нормированной оптимальной периодичности ПО – $Z_{opt} = \tau_{opt.} / T_{0кан.}$ для трех модификаций распределенной структуры ФАР, включающих 61 СВЧ канал, в зависимости от логарифма отношения продолжительности (стоимости) аварийного ремонта ФАР к продолжительности (стоимости) ПО одного канала ФАР при экспоненциальном законе распределения ВБР каналов ФАР: верхняя кривая соответствует распределенной структуре ФАР с 6 резервными каналами, средняя кривая соответствует структуре ФАР с 5 резервными каналами, нижняя кривая соответствует структуре ФАР с 4 резервными каналами

Используя номограммы на рис. 7 и примечание 1, можно определять нормированное значение оптимальной периодичности ПО – $Z_{opt} = \tau_{opt.} / T_{0кан.}$, затем, применяя формулы (1–5), можно определить максимальные значения КТИ или минимальные значения м.о. УЭР.

В табл. 2 представлены значения оптимальной периодичности $\tau_{opt.}$, максимальные значения КТИ и минимальные значения м.о. УЭР для приемной ФАР, передающей ФАР и группы из двух ФАР при экспоненциальном распределении ВБР каналов ФАР.

Таблица 2. Значения оптимальной периодичности

Тип ФАР	Оптимизация по критерию максимума КТИ			Оптимизация по критерию минимума м.о. УЭР		
	Z_{opt}	$\tau_{opt.}$, ч.	$K_{и}(\tau_{opt.})$	Z_{opt}	$\tau_{opt.}$, ч.	$M[C(\tau_{opt.})]$, у.е./((год.*изделие)
Приемная	0,048	240	0,9912	0,038	190	0,7586
Передающая	0,028	140	0,9838	0,024	120	2,0692
Группа из двух ФАР	0,034	170	0,9746	0,026	130	2,8832

В табл. 3 представлены значения оптимальной периодичности $\tau_{\text{опт.}}$, максимальные значения КТИ и минимальные значения м.о. УЭР для приемной ФАР, передающей ФАР и группы из двух ФАР при диффузионном немонотонном распределении ВБР каналов ФАР.

Таблица 3. Значения оптимальной периодичности

Тип ФАР	Оптимизация по критерию максимума КТИ			Оптимизация по критерию минимума м.о. УЭР		
	$Z_{\text{опт}}$	$\tau_{\text{опт.}}, \text{ ч.}$	$K_{\text{и}}(\tau_{\text{опт.}})$	$Z_{\text{опт}}$	$\tau_{\text{опт.}}, \text{ ч.}$	$M[C(\tau_{\text{опт.}})], \text{ у.е./}(\text{год.} \cdot \text{изделие})$
Приемная	0,098	490	0,9988	0,098	490	0,0998
Передающая	0,050	250	0,9975	0,050	250	0,2997
Группа из двух ФАР	0,060	300	0,9957	0,056	280	0,4528

Анализ данных табл. 2 и 3 показывает, что при использовании диффузионного немонотонного распределения для ВБР СВЧ каналов ФАР:

- значения оптимальной периодичности ПО – $\tau_{\text{опт}}$ в 1,6 – 2,1 раз больше, чем значения $\tau_{\text{орт}}$, при использовании экспоненциального распределения;
- максимальные значения КТИ – $K_{\text{и}}(\tau_{\text{опт.}})$ больше, чем значения $K_{\text{и}}(\tau_{\text{орт.}})$, при использовании экспоненциального распределения;
- минимальные значения м.о. УЭР – $M[C(\tau_{\text{опт.}})]$ меньше, чем значения $M[C(\tau_{\text{орт.}})]$, при использовании экспоненциального распределения.

Следовательно, применение диффузионного немонотонного распределения при оценке эффективности технического обслуживания ФАР позволяет получить значительный выигрыш в технико-экономических характеристиках.

6. Выводы

1. Применение диффузионного немонотонного распределения по сравнению с экспоненциальным распределением для оценки эффективности технического обслуживания ФАР дает значительный выигрыш в технико-экономических характеристиках.
2. Полученные в данной работе аналитические выражения для определения оптимальной периодичности профилактического обслуживания группы ФАР позволяют построить оптимальный регламент технического обслуживания для антенного поста РЛС в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатов В.А. Статистическая оптимизация качества функционирования электронных систем / Игнатов В.А., Маньшин Г.Г., Трайнев В.А. – Москва: Энергия, 1974. – 264 с.
2. Игнатов В.А. Элементы теории оптимального технического обслуживания / Игнатов В.А., Маньшин Г.Г., Костановский В.В. – Минск: Наука и техника, 1974. – 192 с.
3. Костановський В.В. Оптимізування технічного обслуговування фазованих антенних решіток / В.В. Костановський // Математичні машини і системи. – 2015. – № 1. – С. 164 – 170.
4. Азарсков В.Н. Надежность систем управления и автоматики: учебн. пособ. / В.Н. Азарсков, В.П. Стрельников. – К.: НАУ, 2002. – 164 с.

Стаття надійшла до редакції 28.12.2016