

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОТКАЗНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ АПЕРТУР ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*Национальный авиационный университет, Киев, Украина

***Анотація.** Пропонується метод імовірнісного аналізу безвідмовності і довговічності апертур фазованих антенних решіток радіолокаційних і гідроакустичних станцій на основі статистичної інформації щодо інтенсивностей раптових та поступових відмов електрорадіоелементів, отриманої з довідників щодо надійності і технічних умов.*

***Ключові слова:** імовірнісний аналіз безвідмовності і довговічності, апертури фазованих антенних решіток, інтенсивності раптових та поступових відмов електрорадіоелементів.*

***Аннотация.** Предлагается метод вероятностного анализа безотказности и долговечности апертур фазированных антенных решеток радиолокационных и гидроакустических станций на основе статистической информации об интенсивностях внезапных и постепенных отказов электроакустических элементов, полученной из справочников по надежности и технических условий.*

***Ключевые слова:** вероятностный анализ безотказности и долговечности, апертуры фазированных антенных решеток, интенсивности внезапных и постепенных отказов электрорадиоэлементов.*

***Abstract.** The paper proposes a method of probabilistic analysis of reliability and durability of the aperture of phased array antennas of radiodetector and hydroacoustic stations, based on the statistical information on the intensity of sudden and degradation failures of electronic components obtained from reference books on the reliability and technical conditions.*

***Keywords:** probabilistic analysis of reliability and durability, aperture of phased array antenna, the intensity of sudden and degradation failures of electronic components.*

1. Введение

В современной научно-технической литературе появился ряд работ по анализу надежности апертур фазированных антенных решеток (ФАР) [1–3]. Однако предлагаемые в этих работах математические модели надежности ФАР учитывают, в основном, только внезапные отказы. Так, в работах [2, 3] предложены математические модели надежности апертуры ФАР на основе:

- экспоненциального распределения – для учета влияния внезапных отказов модулей;
- распределения Вейбулла и диффузионного немонотонного распределения – для учета влияния постепенных отказов модулей;
- обобщенного показательного распределения и смеси экспоненциального и распределения Вейбулла – для учета влияния внезапных и постепенных отказов модулей.

Основным недостатком моделей надежности апертуры ФАР, представленных в работах [2, 3], является их некоторая академичность, так как в них не показаны пути практического использования моделей надежности в процессе проектирования.

2. Постановка задачи

В работе [4] разработаны математические модели надежности электрорадиоэлементов (ЭРЭ), позволяющие учесть статистическую информацию о внезапных и постепенных отказах, представляемую в справочниках по надежности ЭРЭ и технических условиях. В данной статье авторами предлагается метод вероятностного анализа безотказности и дол-

говечности апертур ФАР в процессе проектирования на основе математических моделей надежности ЭРЭ, представленных в работе [4].

3. Метод вероятностного анализа безотказности и долговечности апертур фазированных антенных решеток в процессе проектирования

Задачи вероятностного анализа надежности апертур фазированных антенных решеток делятся на два типа:

– задачи вероятностного анализа безотказности и долговечности электронных модулей, входящих в состав апертур ФАР: приемных каналов, передающих СВЧ модулей, модулей электропитания и т.д.

– задачи вероятностного анализа безотказности и долговечности апертуры ФАР в целом.

3.1. Задачи вероятностного анализа безотказности и долговечности электронных модулей в процессе проектирования

3.1.1. Выбор математической модели безотказности и долговечности электронного модуля, определение режимов работы модуля, условий применения и параметров окружающей среды.

3.1.2. Определение статистических данных об отказах ЭРЭ (на основе справочников по надежности и технических условий) с учетом режимов работы электронного модуля и коэффициентов жесткости окружающей среды:

– об эксплуатационных интенсивностях (внезапных и постепенных) отказов ЭРЭ, входящих в состав электронного модуля, $\lambda_{Эi}, i = \overline{1, s}$;

– о распределении внезапных и постепенных отказов ЭРЭ по видам $\lambda_{Эi_внз.}(\%)$ и $\lambda_{Эi_пост.}(\%), i = \overline{1, s}$;

– о показателях долговечности ЭРЭ: минимальной наработки $t_{нм_i}$ и гамма-процентного ресурса T_{γ_i} .

3.1.3. Определение показателей безотказности электронного модуля:

– вероятности безотказной работы – $P_{МОД}(t)$;

– средней наработки до отказа (среднего ресурса) – $T_{0_МОД}$.

3.1.4. Определение показателей долговечности электронного модуля:

– гамма-процентного ресурса – $T_{\gamma_МОД}$ ($\gamma=0,95; 0,90; 0,80$);

– среднего ресурса – $T_{P_МОД}$ ($\gamma=0,368$ – для экспоненциального распределения, $\gamma=0,332 \div 0,500$ – для остальных распределений).

3.1.5. Определение коэффициентов влияния i -го ЭРЭ на надежность модуля в целом – $KV_i(T_{\gamma_МОД}), i = \overline{1, s}$.

3.2. Задачи вероятностного анализа безотказности и долговечности распределенной апертуры ФАР в целом в процессе проектирования

3.2.1. Выбор математической модели безотказности и долговечности распределенной апертуры ФАР, определение режимов работы апертуры, условий применения и параметров окружающей среды.

3.2.2. Построение структурной схемы надежности распределенной апертуры ФАР. Определение перечня электронных модулей в составе апертуры ФАР. Определение показателей

безотказности и долговечности электронных модулей (составных частей апертуры ФАР) на основе статистической информации о надежности ЭРЭ (см. задачи разд. 3.1).

3.2.3. Определение показателей безотказности апертуры ФАР:

– средней наработки до отказа апертуры ФАР (среднего ресурса) – $T_{0_МОД}(T_{P_МОД})$;

– вероятности безотказной работы апертуры ФАР за нормированное оперативное

время работы – $P_A\left(\frac{t_0}{T_{0_МОД}}\right)$.

3.2.4. Определение показателей долговечности апертуры ФАР:

– гамма-процентного ресурса ($\gamma = 0,95; 0,98; 0,99$);

– среднего ресурса ($\gamma = 0,332 \div 0,500$).

Примечание. Для необслуживаемых (невосстанавливаемых) устройств и систем показатели долговечности и безотказности совпадают, так как критерии отказов и критерии предельного состояния для необслуживаемых устройств и систем полностью совпадают. Поэтому распределение вероятности безотказной работы (наработки) и распределение ресурса (времени жизни) устройства также совпадают.

3.3. Модели надежности электронного модуля

3.3.1. Вероятность безотказной работы (ВБР) электронного модуля определяется как произведение ВБР для всех s типоминималов ЭРЭ:

$$P_{МОД}(t) = \prod_{i=1}^s [P_{ЭРЭ_i}(t)]^{n_i}, \quad (1)$$

где n_i – количество элементов i -го типоминимала ЭРЭ.

3.3.2. Для проведения вероятностного анализа безотказности и долговечности электронного модуля используются три модели надежности: экспоненциальное распределение (ЭР) и две суперпозиции распределений: первая – экспоненциального и распределения Вейбулла (ЭР*ВР) и вторая – экспоненциального и диффузионного немонотонного распределения (ЭР*ДНР).

Аналитические выражения ВБР ЭРЭ для указанных выше распределений имеют вид:

– для экспоненциального распределения:

$$P_{ЭРЭ_Э}(t) = \exp(-\lambda_{Э_внеш.} t); \quad (2)$$

– для суперпозиции экспоненциального распределения и распределения Вейбулла:

$$P_{ЭРЭ_Э*В}(t) = \exp\left\{-\left[\lambda_{Э_внеш.} t + \left(\frac{b_m t}{T_{0В}}\right)^m\right]\right\}; \quad (3)$$

– для суперпозиции экспоненциального распределения и диффузионного немонотонного распределения:

$$P_{ЭРЭ_Э*ДН}(t) = \exp(-\lambda_{Э_внеш.} t) \left[\Phi\left(\frac{T_{0_ДН} - t}{\nu \sqrt{T_{0_ДН} t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{T_{0_ДН} + t}{\nu \sqrt{T_{0_ДН} t}}\right) \right]. \quad (4)$$

3.3.3. Показатели долговечности электронного модуля, то есть гамма-процентные ресурсы T_γ определяются из решения нелинейного уравнения:

$$\gamma = \prod_{i=1}^N [P_{ЭРЭ_i}(T_\gamma)]^{n_i}. \quad (5)$$

3.3.4. Средняя наработка до отказа электронного модуля, которая является для модуля также средним ресурсом, определяется по известной в теории надежности формуле:

$$T_{0_МОД} = \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^N [P_{ЭРЭ_i}(t)]^{n_i} dt. \quad (6)$$

3.3.5. Для суперпозиции распределений значения средней наработки до отказа $T_{0_МОД}$ вычисляются как средние ресурсы с использованием квантилей распределений: для модели ЭР*ДНР при $\gamma=0,332$ и для модели ЭР*ВР при $\gamma=0,480$. Квантили распределений определяются из решения нелинейного уравнения (5).

3.3.6. Коэффициенты влияния i -го ЭРЭ на надежность электронного модуля $KV_i(T_\gamma), i = \overline{1, s}$ находятся для моментов времени, соответствующих гамма-процентному ресурсу модуля по формуле:

$$KV_i(T_\gamma) = \frac{n_i \ln P_{ЭРЭ_i}(T_\gamma)}{\ln P_{Э_МОД}(T_\gamma)} 100\%, \quad i = \overline{1, s}. \quad (7)$$

Для экспоненциального закона распределения коэффициенты влияния не зависят от времени и определяются по формуле:

$$KV_i(T_\gamma) = \frac{n_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^s n_i \lambda_i} 100\%, \dots i = \overline{1, s}. \quad (8)$$

3.4. Математические модели надежности апертуры ФАР

3.4.1. Показателями безотказности апертуры ФАР являются вероятность

безотказной работы $P_A(\frac{t_0}{T_{0_МОД}})$ за оперативное время t_0 и средняя наработка до отказа $T_{0_А}$.

3.4.2. Вероятность безотказной работы $P_A(z_0)$ апертуры ФАР, которая включает n – рабочих и m – резервных СВЧ модулей ($n + m = N$), определяется при использовании модели надежности резервированной системы с дробной кратностью по формуле [2]:

$$P_A(\frac{t_0}{T_{0_МОД}}) = \sum_{j=0}^m C_N^j [P_{МОД}(\frac{t_0}{T_{0_МОД}})]^{N-j} [1 - P_{МОД}(\frac{t_0}{T_{0_МОД}})]^j, \quad (9)$$

где $P_{МОД}(\frac{t_0}{T_{0_МОД}})$ – вероятность безотказной работы электронного модуля (подрешетки, канала – для апертуры приемной ФАР, СВЧ модуля – для апертуры передающей ФАР);

$z_0 = \frac{t_0}{T_{0_МОД}}$ – нормированное (относительно $T_{0_МОД}$) время наработки апертуры ФАР.

3.4.3. Показателями долговечности апертуры ФАР являются гамма-процентные ресурсы $T_{\gamma_А}$, которые определяются из решения нелинейного уравнения (10) при значениях $\gamma = 0,90; 0,95; 0,98; 0,99$:

$$\gamma = \sum_{j=0}^m C_N^j [P_{МОД}(z_\gamma)]^{N-j} [1 - P_{МОД}(z_\gamma)]^j, \quad (10)$$

где $z_\gamma = \frac{t_\gamma}{T_{0_МОД}}$.

3.4.4. Средняя наработка до отказа апертуры ФАР – T_{0_A} определяется приближенно одним из трех методов:

– при использовании формул численного анализа (при интегрировании ВБР апертуры ФАР по формуле, аналогичной формуле (6));

– из решения нелинейного уравнения (9) (как средний ресурс апертуры) при значениях $\gamma = 0,427$ (апертура ФАР – 64/3), $\gamma = 0,460$ (апертура ФАР – 256/12), $\gamma = 0,470$ (апертура ФАР – 256/25);

– из решения нелинейного уравнения (11):

$$P_{МОД}(T_{0_A}) = \ln \frac{N - m - 1}{N}. \quad (11)$$

Количество необходимых для замены запасных электронных модулей определяется как количество отказавших электронных модулей в апертуре ФАР за оперативное время работы $r(t_0)$ по следующей формуле:

$$r(t_0) = N[1 - P_{МОД}(t_0)], \quad (12)$$

где N – общее количество, а m – соответственно, количество избыточных (резервных) электронных модулей в апертуре ФАР.

4. Пример вероятностного анализа безотказности и долговечности электронного модуля

4.1. Исходные данные для вероятностного анализа (прогнозирования) безотказности и долговечности электронного модуля представлены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели надежности электрорадиоэлементов электронного модуля

Наименование ЭРЭ	Количество, n_i	Эксплуатационная интенсивность отказов, $\lambda_E * 10^6, 1/ч$	Процент внезапных отказов	Процент постепенных отказов	Минимальная наработка, $t_{нм}, ч$	Гамма-процентный ресурс, $T_\gamma, ч$
Конденсатор К53-18А	3	0,138	44	56	45	90
Конденсатор К10-17	4	0,024	41	59	25	150
Резистор С2-29В, 274 Ом	4	0,04227	5	95	25	105
Резистор С2-29В, 274 кОм	10	0,0791	5	95	25	105
Резистор СП5-2ВБ, 1,5 Ом	2	0,01457	83	17	20	80
Транзистор 2Т3130А-5	1	0,0952	20	80	50	100
Вилка ГРПМ1-90ШУ2	1	0,01114	95	5	5	100
Микросхема	16	0,04428	50	50	25	200

533ТЛ2, 1533ЛН1, 585РИ1						
Печатная плата, печатные пайки	2	0,200	5	95	25	200

4.2. В табл. 2 представлены результаты расчета средней наработки до отказа электронного модуля для трех математических моделей надежности: экспоненциального распределения (ЭР) и суперпозиции распределений: ЭР*ДНР и ЭР*ВР.

Таблица 2. Средняя наработка до отказа электронного модуля для трех моделей надежности

Тип распределения Наименование ЭРЭ	Средняя наработка до отказа, ч			Коэффициенты распределений	
	ЭР	ЭР*ВР	ЭР*ДНР	формы m (для ЭР*ВР)	вариации ν (для ЭР*ДНР)
Конденсатор К53-18А	7246377	185931	656020	3,72	1,16
Конденсатор К10-17	41666667	395636	473570	2,76	0,65
Резистор С2-29В, 274 Ом	23657440	276628	418176,7	2,74	0,79
Резистор С2-29В, 274кОм	12642225	339867	384636	2,30	0,74
Резистор СП5-2ВБ	68634180	133620	461669,8	4,99	1,04
Транзистор 2Т3130А-5	10504201	203496	693066,9	3,70	1,16
Вилка ГРПМ1-90ШУ2	89766607	223805	145401	3,27	0,22
Микросхема 533Л2, 1533ЛН1, 585РИ1	22583559	743227	449879,5	2,13	0,45
Печатная плата, печатные пайки	5000000	2813100	334546,3	1,13	0,29

4.3. На рис. 1 представлены вероятности безотказной работы электронного модуля для трех распределений: ЭР, ЭР*ВР и ЭР*ДНР.

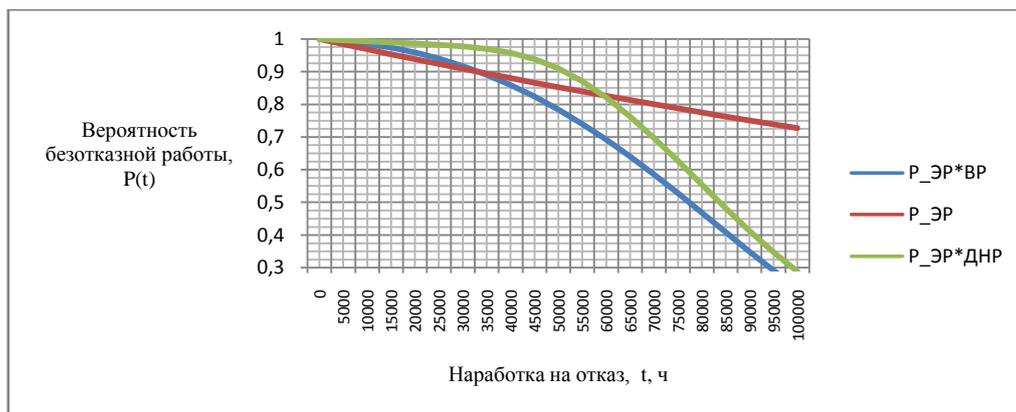


Рис. 1. Вероятность безотказной работы электронного модуля при различных распределениях наработки ЭРЭ – экспоненциальном: ЭР; суперпозиции распределений: экспоненциального и Вейбулла – ЭР*ВР; суперпозиции распределений: экспоненциального и диффузионного немонотонного – ЭР*ДНР

4.4. В табл. 3 представлены результаты расчета гамма-процентного ресурса электронного модуля для трех распределений: ЭР, ЭР*ВР и ЭР*ДНР.

Таблица 3. Гамма-процентный ресурс электронного модуля для различных моделей надежности ЭРЭ

Вид математической модели надежности ЭРЭ	Гамма-процентный ресурс T_γ						
	$\gamma = 0,99$	$\gamma = 0,98$	$\gamma = 0,95$	$\gamma = 0,90$	$\gamma = 0,368$	$\gamma = 0,332$	$\gamma = 0,48$
$P(t)_{ЭР}$	3747	7532	19125	39284	372856	–	–
$P(t)_{ВР}$	7664	12628	22431	32919	–	–	76243
$P(t)_{ЭР*ДНР}$	14407	27857	43508	53274	–	98322	–

4.5. В табл. 4 представлены результаты расчета коэффициентов влияния ЭРЭ на надежность в моменты времени, соответствующие гамма-процентному ресурсу электронного модуля при $\gamma = 0,90$ для трех распределений: ЭР, ЭР*ВР и ЭР*ДНР.

Таблица 4. Коэффициенты влияния ЭРЭ на 90-процентный ресурс электронного модуля

Наименование ЭРЭ	Коэффициент влияния $KV_i(T_{\gamma=0,9})$, %		
	Тип распределения		
	ЭР	ЭР*ВР $T_{\gamma=0,9}=32\ 919$ ч	ЭР*ДНР $T_{\gamma=0,9}=53\ 724$ ч
1. Конденсатор К53-18А	15,43	8,804	26,48
2. Конденсатор К10-17	3,58	4,115	2,14
3. Резистор С2-29В, 274 Ом	6,30	8,379	7,54
4. Резистор С2-29В, 274 кОм	29,49	34,77	17,21
5. Резистор СП5-2ВБ	1,09	1,893	22,34
6. Транзистор 2Т3130А-5	3,55	1,364	4,83
7. Вилка ГРПМ1-90ШУ2	0,42	1,594	0,54
8. Микросхема 533Л2, 1533ЛН1, 585РИ1	25,22	26,277	17,91
9. Печатная плата, печатные пайки	14,91	12,805	1,01

Вероятностный анализ безотказности электронного модуля показал (рис. 1), что:

– для суперпозиции распределений ЭР*ВР значения вероятности безотказной работы в период времени от 0 до 25 000 ч превышают значения ВБР для экспоненциального распределения;

– для суперпозиции распределений ЭР*ДНР значения вероятности безотказной работы в период времени от 0 до 55 000 ч превышают значения ВБР для экспоненциального распределения.

Вероятностный анализ долговечности электронного модуля показал (табл. 3), что:

– значения гамма-процентного ресурса (при $\gamma = 0,95$) для распределения ЭР*ВР составляет $T_{\gamma=0,95}=22\ 431$ ч, для распределения ЭР*ДНР – $T_{\gamma=0,95}=43\ 508$ ч, что значительно превышает значение гамма-процентного ресурса для экспоненциального распределения $T_{\gamma=0,95}=19\ 125$ ч;

– значения гамма-процентного ресурса (при $\gamma = 0,90$) для распределения ЭР*ВР составляет $T_{\gamma=0,90}=32\ 919$ ч, для распределения ЭР*ДНР – $T_{\gamma=0,90}=53\ 274$ ч, что значительно

превышает значение гамма-процентного ресурса для экспоненциального распределения $T_{\gamma=0,90}=39\ 284$ ч.

Вероятностный анализ коэффициентов влияния ЭРЭ показал, что для модели ЭР*ВР наибольшее влияние на надежность электронного модуля имеют резисторы С2 – 29В (274 кОм) – $KV_4(T_{\gamma=0,9})=34,77\%$ ($n_4=10$) и микросхемы 533Л2, 1533ЛН1, 585РИ1 – $KV_8(T_{\gamma=0,9})=26,28\%$ ($n_8=16$).

5. Пример вероятностного анализа безотказности и долговечности типовых апертур ФАР

5.1. Исходными данными для вероятностного анализа безотказности и долговечности апертур ФАР являются данные, представленные в табл. 1, для анализа надежности.

5.2. Вероятностный анализ безотказности и долговечности проводился для трех типовых структур ФАР:

– 1-я типовая апертура приемной ФАР – общее число приемных каналов – $N=64$, количество избыточных (резервных) приемных каналов – $m=3$;

– 2-я типовая апертура передающей ФАР – общее число электронных СВЧ модулей – $N=256$, количество избыточных (резервных) СВЧ модулей – $m=12$;

– 3-я типовая апертура приемной ФАР – общее число приемных каналов – $N=256$, количество избыточных (резервных) приемных каналов – $m=25$.

5.3. В результате анализа определены вероятность безотказной работы (ВБР), средняя наработка до отказа, средний ресурс и гамма-процентный ресурс для типовых структур ФАР.

5.4. На рис. 2–4 представлены кривые для вероятности безотказной работы трех апертур ФАР (1-ая апертура – $N=64$, $m=3$; 2-ая апертура – $N=256$, $m=12$; 3-я апертура – $N=256$, $m=25$) для трех распределений вероятности безотказной работы: ЭР, ЭР*ВР и ЭР*ДНР.

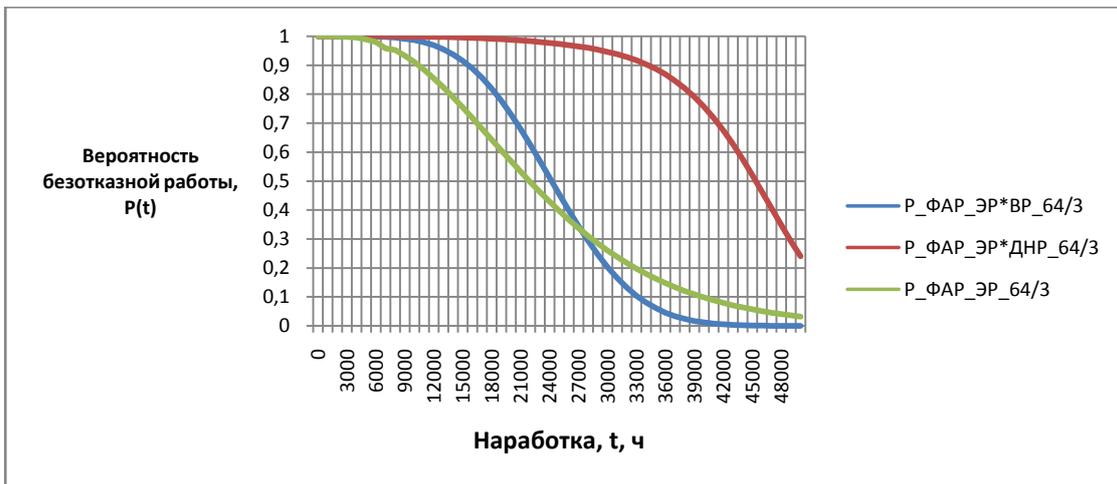


Рис. 2. Вероятность безотказной работы ФАР на 64 модуля (3 модуля избыточные) при экспоненциальном распределении (ЭР) и двух суперпозициях распределений наработки ЭРЭ (ЭР*ВР и ЭР*ДНР) модулей ФАР

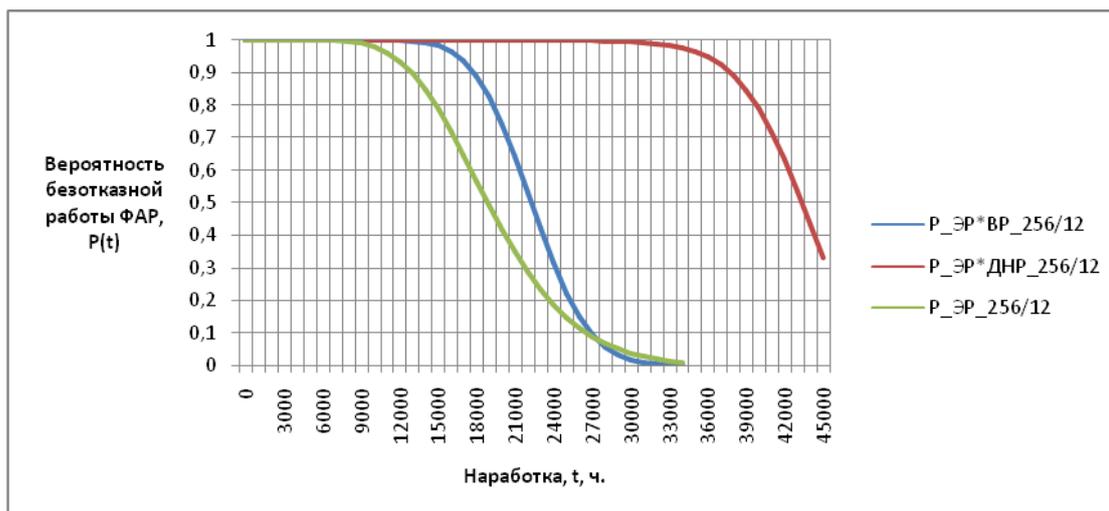


Рис. 3. Вероятность безотказной работы ФАР на 256 модулей (12 модулей избыточные) при экспоненциальном распределении (ЭР) и двух суперпозициях распределений наработки ЭРЭ (ЭР*ВР и ЭР*ДНР) модулей ФАР

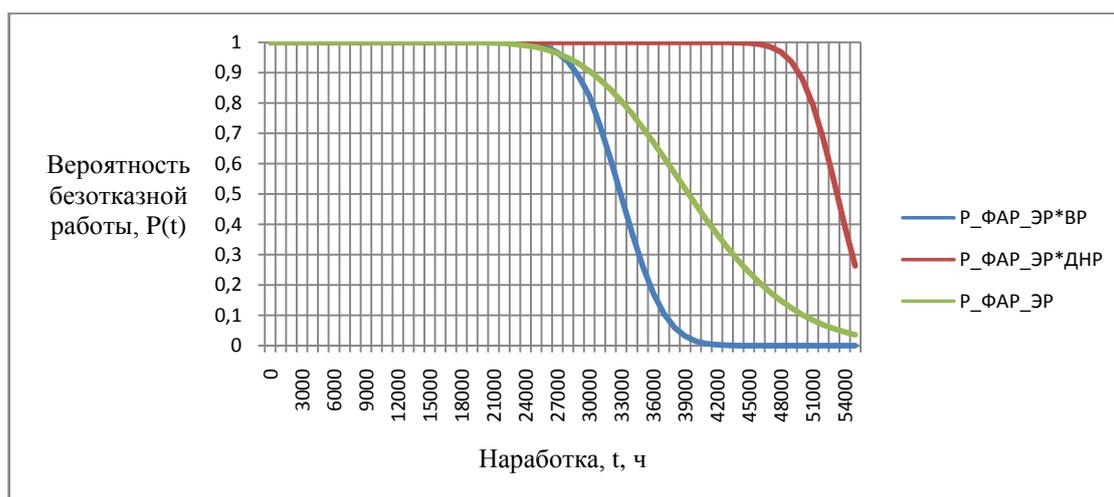


Рис. 4. Вероятность безотказной работы ФАР на 256 модулей (25 модулей избыточные) при экспоненциальном распределении (ЭР) и двух суперпозициях распределений наработки ЭРЭ (ЭР*ВР и ЭР*ДНР) модулей ФАР

5.5. В табл. 5–7 представлены значения гамма-процентного ресурса при $\gamma = 0,99; 0,98; 0,95; 0,90$ трех типовых апертур ФАР для трех распределений ВБР: ЭР, ЭР*ВР и ЭР*ВБР.

Таблица 5. Гамма-процентный ресурс при $\gamma = 0,99$

Тип структуры	ФАР 64/3	ФАР 256/12	ФАР 256/25
ЭР	4912	9097	23940
ЭР*ВР	9370	14302	25410
ЭР*ДНР	18866	31726	46547

Таблица 6. Гамма-процентный ресурс при $\gamma = 0,98$

Тип структуры	ФАР 64/3	ФАР 256/12	ФАР 256/25
ЭР	6063	10000	25481
ЭР*ВР	10885	15198	26284
ЭР*ДНР	23123	33498	47406

Таблица 7. Гамма-процентный ресурс при $\gamma = 0,95$

Тип структуры	ФАР 64/3	ФАР 256/12	ФАР 256/25
ЭР	8152	11470	27919
ЭР*ВР	13310	16566	27600
ЭР*ДНР	29528	35879	48636

5.6. В табл. 8 представлены значения средней наработки до отказа (среднего ресурса) типовых апертур ФАР для трех законов распределения времени безотказной работы: ЭР, ЭР*ВР и ЭР*ДНР

Таблица 8. Средняя наработка до отказа (средний ресурс) апертуры ФАР

Тип структуры	ФАР 64/3	ФАР 256/12	ФАР 256/25
ЭР	24064	19432	39932
ЭР*ВР	25482	22634	33191
ЭР*ДНР	46636	43728	53501

5.7. В табл. 9 представлены значения количества запасных электронных модулей для обеспечения гамма-процентного ресурса T_γ и среднего ресурса типовых структур апертуры ФАР.

Таблица 9. Количество запасных электронных модулей для обеспечения гамма-процентного ресурса T_γ и среднего ресурса ФАР

Наименование прибора	$\gamma = 0,99$	$\gamma = 0,98$	$\gamma = 0,95$	Средний ресурс
Апертура ФАР 64/3	1 (0,84)	1 (1,03)	1 (1,384)	4
Апертура ФАР 256/12	6 (6,17)	7 (6,775)	8 (7,755)	13
Апертура ФАР 256/25	16 (15,92)	17 (16,91)	19 (18,470)	26

5.8. Вероятностный анализ безотказности апертур ФАР, представленных в примере 5, показал, что:

– значения вероятности безотказной работы для приемных апертур $-P_A\left(\frac{t_0}{T_{0_МОД}}\right)$ на

$N = 64$ модуля ($m = 3$) и на $N = 256$ модулей ($m = 12$) для модели ЭР*ДНР больше значений ВБР для модели ЭР*ВР и, соответственно, значения ВБР для экспоненциального распределения меньше значений ВБР для моделей ЭР*ВР и ЭР*ДНР;

– на интервале наработки апертуры от 0 до 27 000 ч значения вероятности безотказной работы для приемных апертур на $N = 256$ модулей ($m = 25$) изменяются аналогично значениям ВБР (разд. 5.8);

– на интервале наработки апертуры от 27 000 ч и далее значения вероятности безотказной работы для модели ЭР*ДНР больше значений ВБР для экспоненциального распре-

деления и, соответственно, значения ВБР для модели ЭР*ВР меньше значений ВБР для модели ЭР*ДНР и экспоненциального распределения;

– значения средней наработки до отказа апертур T_{0_A} на $N=64$ модуля ($m=3$) и $N=256$ модулей ($m=12$) для модели ЭР*ДНР в два раза больше, чем значения T_{0_A} для модели ЭР*ВР и экспоненциального распределения;

– значения наработки до отказа апертуры на $N=256$ модулей ($m=25$) для модели ЭР*ДНР в 1,5 раза больше, чем значения T_{0_A} для модели ЭР*ВР и экспоненциального распределения.

Анализ показателей долговечности типовых структур ФАР показал, что наибольшие значения гамма-процентного ресурса T_γ соответствуют модели ЭР*ДНР, а наименьшие значения T_γ , в основном, экспоненциальному распределению.

Анализ требуемого количества запасных электронных модулей $r(t)$ для обеспечения заданной вероятности $P_{зипп}(t)$ показал, что значение $r(t)$ не зависит от вида математической модели для вероятности безотказной работы модуля. Однако наработка апертуры ФАР, обеспечиваемая запасными модулями, для различных плотностей распределения вероятности безотказной работы электронного модуля значительно отличается. Так, для апертуры ФАР на $N=256$ модулей ($m=12$), если $P_{зипп} = 0,98$ имеем:

– для модели ЭР*ДНР – $t(P_{зипп} = 0,98) = 33\,498$ ч;

– для модели ЭР*ВР – $t(P_{зипп} = 0,98) = 15\,192$ ч;

– для экспоненциального распределения – $t(P_{зипп} = 0,98) = 10\,000$ ч.

6. Выводы и рекомендации

6.1. Наиболее перспективной математической моделью для аппроксимации реальной (статистической) вероятности безотказной работы ЭРЭ при вероятностном анализе надежности электронных модулей является суперпозиция экспоненциального и диффузионного монотонного распределений (модель ЭР*ДНР).

6.2. Использование математической модели ЭР*ДНР при вероятностном анализе надежности электронных модулей на основе статистических данных по отказам ЭРЭ позволяет определять более точные (реальные) оценки показателей безотказности и долговечности модулей, чем простое использование экспоненциального распределения.

6.3. Применение модели ЭР*ДНР при вероятностном анализе надежности апертур ФАР на основе статистических данных по ЭРЭ позволяет определять реальные показатели безотказности и долговечности апертур ФАР и нужное количество запасных частей при эксплуатации ФАР.

6.4. Представленный в статье метод вероятностного анализа надежности необслуживаемой электронной системы рекомендуется для применения в НИИ и КБ при разработке радиоэлектронных систем, так как позволяет не только анализировать показатели безотказности, но и прогнозировать показатели долговечности проектируемых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суранов А.А. Исследование активных фазированных антенных решёток / Суранов А.А., Ниеталин Ж.Н., Джаманшалов М.У. – Республика Казахстан: Изд. Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева, 2012. – С. 1 – 6.
2. Костановский В.В. Математическая модель расчета надежности невосстанавливаемых фазированных антенных решеток / В.В. Костановский // Измерительная техника. – 2014. – № 1. – С. 56 – 59.

3. 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.
4. Костановський В.В. Математичні моделі прогнозування показників безвідмовності та довговічності електрорадіовиробів на основі статистичних даних про відмови / В.В. Костановський, О.Д. Козачук // Математичні машини і системи. – 2015. – № 2. – С. 157 – 169.

Стаття надійшла до редакції 22.05.2015