

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ И СУПЕРПОЗИЦИОННЫХ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОТКАЗОВ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.В. Алексеев¹, Ю.П. Батырев², М.А. Болдырев¹,
П.С. Воронцов¹, Р.И. Князев¹, Ю.Т. Котов²

¹ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, 129327, Москва, Чукотский проезд, домовладение 10

²МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

kotov46@inbox.ru

Приведена реализация разработанного расчетного структурного метода оценки надежности сложных электротехнических изделий, в основе которого лежит использование сочетаний композиционных и суперпозиционных законов распределения вероятностей отказов. Дана оценка надежности вращающегося трансформатора типа ВТ-5. Проведено сравнение расчетных показателей надежности с результатами определительных испытаний ВТ-5 на надежность. Получена высокая сходимость результатов.

Ключевые слова: электротехнические изделия, надежность изделия, показатели надежности, структурная схема надежности, составляющий элемент изделия, закон распределения вероятностей отказов, суперпозиционный закон, композиционный закон

Ссылка для цитирования: Алексеев В.В., Батырев Ю.П., Болдырев М.А., Воронцов П.С., Князев Р.И., Котов Ю.Т. Использование композиционных и суперпозиционных законов распределения вероятностей отказов при оценке надежности электротехнических изделий военного назначения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 5. С. 131–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-131-137

Современная тенденция непрерывного роста требований к надежности радиоэлектронной аппаратуры и к ее электронной компонентной базе привела к тому, что требования к гамма-процентной наработке до отказа, в том числе электротехнических изделий, достигают до 100 тыс. ч и более. Учитывая высокую стоимость проведения испытаний, значительные трудовые затраты, длительный срок проведения испытаний (около 12 лет) и многое другое, подтвердить указанные требования экспериментальным путем при значениях гамма, равных 95 и 99 %, довольно затруднительно [1–15].

Цель работы

Цель работы — поиск других методов подтверждения указанных требований. Наиболее перспективным, на наш взгляд, является расчетный метод оценки надежности. Одним из вариантов его реализации является разработанный метод расчета показателей надежности электротехнических изделий [16].

Материалы и методы

Разработанный структурный метод расчета показателей надежности электротехнических изделий включает в себя следующие основные положения:

1) формирование структурной схемы надежности электротехнических изделий на основе их поузлового представления, а при необходимости и дальнейшей детализации узлов на составляю-

щие элементы и их, в свою очередь, на комплектующие элементы;

2) определение видов композиционных законов распределения вероятностей отказов каждого рассматриваемого узла, составляющих и комплектующих элементов;

3) составление аналитического выражения суперпозиционного закона распределения вероятностей отказов электротехнического изделия с использованием аналитических выражений композиционных законов распределения вероятностей отказов узлов, построение гистограммы;

4) определение количественных показателей надежности изделия на основе полученной гистограммы.

Разработанный метод апробирован на конкретном изделии — вращающемся трансформаторе типа ВТ-5.

Результаты и обсуждение

В ходе научно-исследовательской работы «Рубин» [17], направленной на определение количественных показателей надежности вращающихся трансформаторов типа ВТ-5, были проведены испытания их различных узлов, после чего было сформировано изделие и проведены его определительные испытания на надежность. Объем выборки составил по 40 шт. для основных узлов и для изделия.

Испытания ВТ-5 показали, что 90 % отказов зафиксировано у подшипникового узла, остальные — у контактного узла. Отказы обмоточного и конструктивного узлов не зафиксированы.

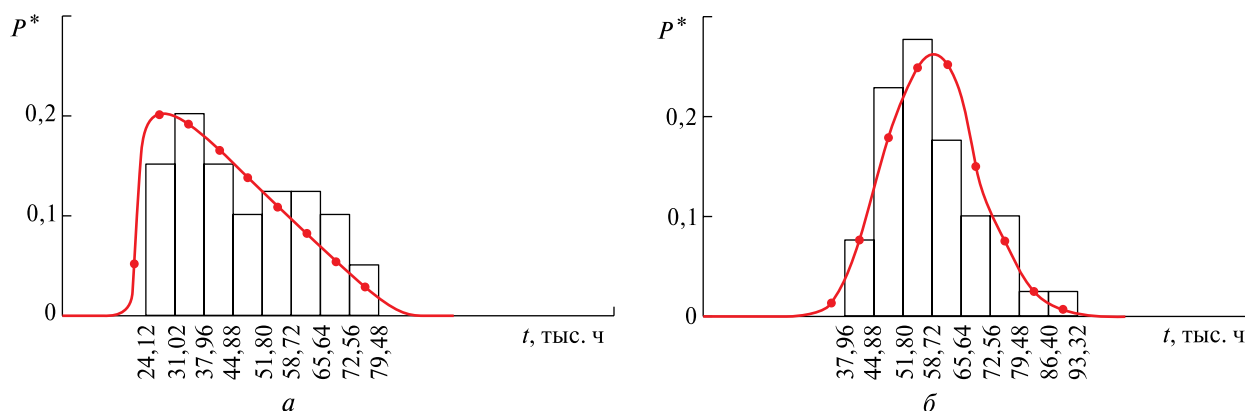


Рис. 1. Законы распределения вероятностей отказов подшипникового (а) и контактного (б) узлов вращающегося трансформатора типа ВТ-5: *t* — наработка ВТ-5, *p** — статистическая вероятность попадания конкретного значения наработки в рассматриваемый разряд гистограммы
Fig. 1. Failures probability distribution law of bearing (a) and contact (b) units of a rotating transformer BT-5 type: *t* — the operating time of BT-5, *p** — the statistical probability of getting a specific value of the operating time into the considered bit of the histogram

Таким образом, по полученным данным испытаний подшипникового и контактного узлов, построены гистограммы отказов узлов. Полученные гистограммы согласуются с композиционными законами. Гистограммы и согласующиеся с ними композиционные законы распределения вероятностей представлены на рис. 1, а, б.

На рис. 1 композиционный закон показан в виде непрерывной кривой плотности распределения. Вид композиции один и тот же и для варианта а и для варианта б. Результаты согласования: для варианта а — математическое ожидание $M = 46630$ ч, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 15395$ ч, диапазон закона $d = 55880$ ч, критерий согласия хи-квадрат Пирсона $\chi^2 = 6,38$, вероятность согласования $p = 0,39$; для варианта б — $M = 58550$ ч, $\sigma = 11803$ ч, $d = 49900$ ч, $\chi^2 = 5,97$, $p = 0,43$.

Формирование суперпозиционного закона распределения вероятностей отказов изделия осуществлялось на основе его структурных схем надежности с использованием законов распределения вероятностей отказов его узлов. На рис. 2 приведена структурная схема надежности рассматриваемого вращающегося трансформатора. Указанная последовательная структура отражает поузловое строение трансформатора типа ВТ-5 и означает, что отказ подшипникового (1), контактного (2), обмоточного (3) или конструктивно-механического (4) узла приведет к отказу всего изделия.

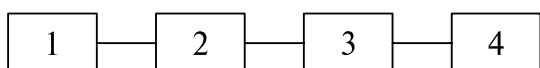


Рис. 2. Структурная схема надежности вращающегося трансформатора типа ВТ-5

Fig. 2. Block diagram of the BT-5 rotating transformer reliability

В общем (неявном) виде аналитическое выражение суперпозиционного закона распределения вероятностей отказов трансформатора типа ВТ-5 выглядит следующим образом

$$g(t) = f_1(t) \cdot p_2(t) \cdot p_3(t) \cdot p_4(t) + f_2(t) \cdot p_1(t) \cdot p_3(t) \cdot p_4(t) + f_3(t) \cdot p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot p_4(t) + f_4(t) \cdot p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot p_3(t), \quad (1)$$

где $f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t)$ — плотности распределения вероятностей появления отказов соответственно подшипникового, контактного, обмоточного и конструктивно-механического узлов;

$p_1(t), p_2(t), p_3(t), p_4(t)$ — вероятности безотказной работы соответственно подшипникового, контактного, обмоточного и конструктивно-механического узлов.

По результатам испытаний очевидно, что слабейшими узлами трансформатора типа ВТ-5 являются подшипниковый и контактный. Следовательно, в создании суперпозиционного закона распределения вероятностей отказов трансформатора типа ВТ-5 участвуют лишь законы отказов таких узлов, диапазоны которых хотя бы в какой-то части пересекают диапазон слабейшего узла. В данном случае диапазоны закона распределения вероятностей отказов обмоточного и конструктивно-механического узлов находятся значительно правее (дальше) границы окончания закона отказов подшипникового узла и не влияют на формирование суперпозиционного закона. Поэтому значения вероятности безотказной работы для обмоточного и механического узлов в формуле (1) равны единице и их можно опустить. А два последних члена суммы в формуле (1) равны нулю, так как вероятность безотказной работы

подшипникового узла для начальных (меньших) значений закона распределения вероятностей обмоточного и механических узлов будет равна нулю (изделие уже отказало).

Следовательно, формула суперпозиционного закона (1) для статистического распределения принимает вид

$$g^*(t) = f_1^*(t) \cdot p_2^*(t) + f_2^*(t) \cdot p_1^*(t), \quad (2)$$

а для теоретического распределения

$$g(t) = f_1(t) \cdot p_2(t) + f_2(t) \cdot p_1(t). \quad (3)$$

Исходя из изложенного, для определения статистического закона формулу (2) в явном виде можно представить следующим образом:

– для первого разряда гистограммы

$$g_1^*(t) = 0,15 \cdot 1,0 = 0,15;$$

– для второго разряда гистограммы

$$g_2^*(t) = 0,2 \cdot 1,0 = 0,2;$$

– для третьего разряда гистограммы

$$g_3^*(t) = 0,15 \cdot 0,9625 + 0,075(1 - 0,035 - 0,075) = 0,1875 \text{ и т. д.}$$

На этом основании графически построены статистический и теоретический суперпозиционные законы (рис. 3).

Для полученных законов определены их параметры: математическое ожидание M , среднее квадратическое отклонение σ и диапазон d .

Особенностью полученного суперпозиционного закона является то, что левая его часть повторяет левую ветвь слабейшего узла (первые два разряда гистограммы одинаковые), а правая часть суперпозиционного закона более быстро приближается к оси времени, чем у закона слабейшего узла (см. рис. 3). Нормировка выполнена — площадь, занимаемая суперпозиционным законом, равна единице. Результаты согласования суперпозиционного закона распределения вероятностей со статистическим законом следующие: $M = 44370$ ч, $\sigma = 11935$ ч, $d = 55880$ ч, $\chi^2 = 2,36$, $p = 0,82$.

Количественные показатели надежности (см. рис. 3) определяют следующим образом:

– гамма-процентную наработку до отказа определяют либо по значению наработки до отказа соответствующего изделия (в нашем случае четвертого из 40 шт. в массиве данных испытаний), либо как соответствующую часть протяженности разряда гистограммы h — в данном случае $(4/6)h$;

– вероятность безотказной работы $p(t)$ вычисляют как сумму вероятностей всех разрядов гистограммы, которые лежат правее рассматриваемого разряда, вероятность которого принимается равной половине (временная координата по середине разряда).

На рис. 4 приведены статистические и теоретические законы распределения вероятностей отказов трансформатора типа ВТ-5, полученные

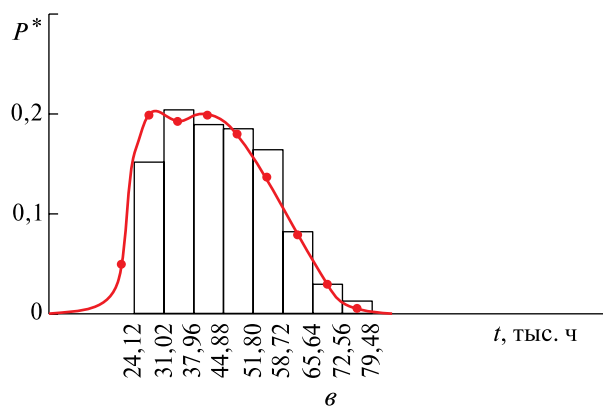
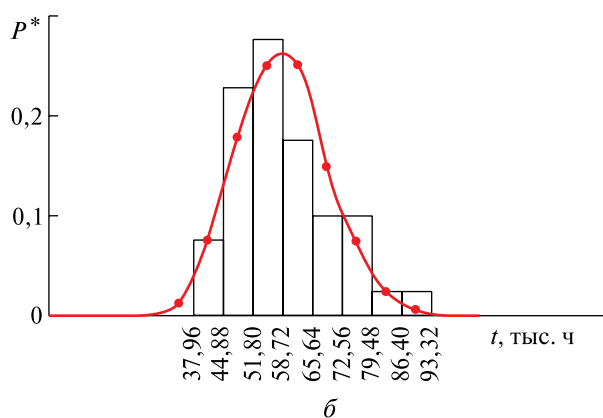
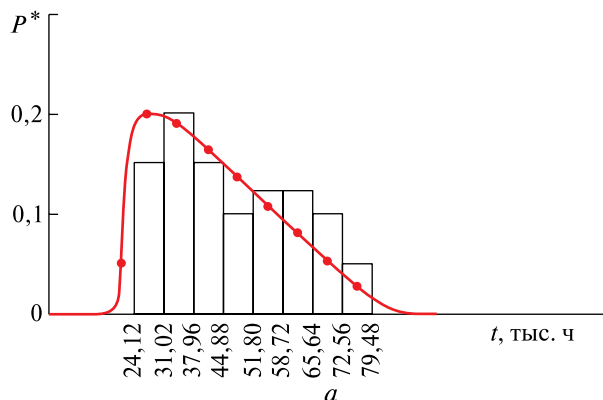


Рис. 3. Законы распределения вероятностей отказов подшипникового (а), контактного (б) узлов и трансформатора типа ВТ-5 (в)

Fig. 3. Failures probability distribution law of bearing (a), contact (b) units and transformer type ВТ-5 (c)

по результатам испытаний установочной партии и расчетным методом.

Результаты согласования статистических и теоретических законов, показанных на рис. 4 следующие: вариант а — статистический закон согласован с композиционным законом вида нормальный с линейно-убывающим; параметры согласования: $M = 46865$ ч, $\sigma = 15175$ ч, $d = 55880$ ч, $\chi^2 = 5,02$, $p = 0,54$; вариант согласования (б) — статистический закон с суперпозиционным законом: $M = 44370$ ч, $\sigma = 11935$ ч, $d = 55880$ ч, $\chi^2 = 2,36$, $p = 0,82$.

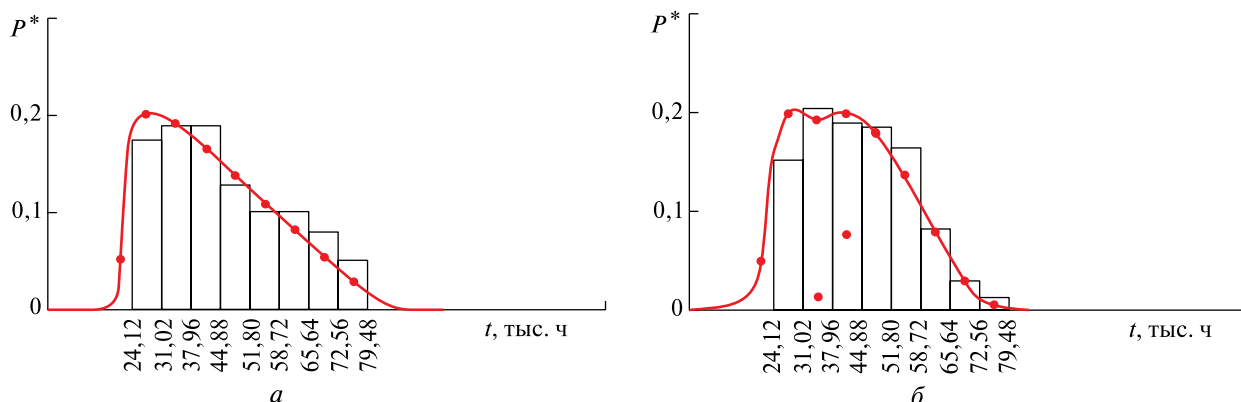


Рис. 4. Статистические и теоретические законы распределения вероятностей отказов трансформатора типа ВТ-5, полученные по результатам испытаний установочной партии (а) и расчетным методом (б)

Fig. 4. Statistical and theoretical failures probability distribution law of the BT-5 type transformer, obtained from the test results of the pilot batch (a) and the calculation method (b)

Количественные показатели надежности трансформатора типа ВТ-5, полученные различными методами из разных источников

Quantitative indicators of the BT-5 transformer reliability, obtained by various methods from different sources

Источник значений показателей надежности	Значения показателей надежности					
	t_{γ}^* , ч для $\gamma = 90\%$	t_{γ} , ч для $\gamma = 90\%$	$\lambda^*(t_{\gamma})$, 1/ч	$\lambda(t_{\gamma})$, 1/ч	$t_{ср}^*$, ч для $\gamma = 50\%$	$t_{ср}$, ч для $\gamma = 50\%$
1. ГОСТ РВ 20.57.414	—	—	—	$3,84 \cdot 10^{-6}$	—	—
2. Справочник по расчету... [18]	27470	25441	$2,53 \cdot 10^{-5}$	$4,91 \cdot 10^{-5}$	46865	42667
3. Предлагаемый метод	28730	26560	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$4,29 \cdot 10^{-5}$	44335	44715
Расхождение результатов п. п. 2 и 3, %	4,6	4,4	15,0	14,5	5,7	4,8

Примечание. t_{γ} , $\lambda(t_{\gamma})$, $t_{ср}$ — значения указанных показателей надежности получены по теоретическим формулам суперпозиционного закона, а те же показатели надежности (обозначены звездочкой) — на основе статистического закона (гистограммы).

Как видно из рис. 4, суперпозиционный закон несколько отличается от закона распределения вероятностей, полученного в результате испытаний. Это отличие обусловлено тем, что процессы старения и износа подшипникового и контактного узлов в чистом виде и в составе изделия несколько отличаются по температуре, составу паров внутри машины и вне ее, не учитывается взаимное влияние узлов изделия и пр.

По статистическим и теоретическим законам (см. рис. 4), определены показатели надежности трансформатора типа ВТ-5. При этом в случае статистических законов значения показателей определены по формулам, указанным в справочнике [18], а для теоретических законов в соответствии с зависимостями, указанными в работе [16].

Полученные значения показателей надежности трансформатора типа ВТ-5 представлены в таблице. Кроме того, в таблице приведены значения показателей надежности, полученные по результатам испытаний [16], а также из справочника «Надежность ЭРИ» [19].

Из таблицы видно, что значение оценки математического ожидания, по данным испытаний, несколько выше, чем расчетные по методике,

что обусловлено более быстрым спадом правой ветви суперпозиционного закона распределения вероятностей. В итоге диапазон расхождения значений показателей надежности составил от 4,4 % до 16 %.

Однако акцентируя внимание на результатах определения интенсивности отказов $\lambda(t)$, определенной по теоретической формуле и по формуле, приведенной в стандарте ГОСТ РВ 20.57.414, можно заметить, что значения различаются более чем в 10 раз.

Такое различие значений интенсивности отказов объясняется нарушением правил использования формулы статистического определения $\lambda^*(t)$. В частности, в справочнике [18] приведено статистическое определение для расчета значения $\lambda^*(t)$

$$\lambda^*(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t} = \frac{n}{N(t)\Delta t}, \quad (4)$$

где $N(t)$ — число изделий, исправных за промежуток времени t ;

n — число отказавших изделий за промежуток времени от t до $(t + \Delta t)$;

Δt — рассматриваемый промежуток времени.

При этом указывается, что на практике Δt должно быть достаточно мало, а n — достаточно велико. И хотя сочетание слов «достаточно мало» не имеет четкой границы, совершенно ясно, что Δt никак несравнимо с t_γ , а должно быть существенно меньше.

Можно предложить два выхода из создавшегося положения. Во-первых, если выборка изделий, на которых проводятся испытания, достаточна для построения статистического закона распределения вероятностей (гистограммы), то в качестве Δt можно принять протяженность разряда гистограммы (h) или его часть, если в разряде гистограммы окажется больше отказавших изделий, чем значение

$$\left(1 - \frac{\gamma}{100}\right)N.$$

Об использовании гистограммы идет речь и в работе [20]. Во-вторых, в формулу

$$\lambda^*(t) = \frac{-\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)}{t_\gamma}$$

можно ввести коэффициент K , равный (0,1...0,15).

Тогда формулу можно записать в следующем виде

$$\lambda^*(t) = K \frac{-\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)}{t_\gamma}. \quad (5)$$

Расхождение значений $\lambda(t)$ и $\lambda^*(t)$ в обоих случаях будет существенно меньше.

Выводы

Разработанный метод расчета показателей надежности электротехнических изделий пригоден к использованию и с удовлетворительной точностью дает оценку надежности рассматриваемых изделий.

Применение данного метода возможно и при прогнозировании показателей надежности разрабатываемых изделий при наличии информации о надежности их узлов, составляющих элементов и комплекующих элементов.

Список литературы

- [1] Жаднов В.В., Жаднов И.В., Полесский С.Н. Современные проблемы автоматизации расчетов надежности // Надежность, 2007. № 2. С. 3–12.
- [2] Борисов А.А., Исаев В.М. О некоторых подходах к оценке надежности сложной электронной компонентной базы нового поколения // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2009. № 3. С. 130–134.
- [3] Батуринов А.В. Определение показателей надежности электронной компонентной базы // Петербургский журнал электроники, 2010. № 2 (63). С. 70–74.
- [4] Батуринов А.В. Стратегия оценки показателей надежности иностранной ЭКБ // Петербургский журнал электроники, 2011. № 3–4. С. 65–70.
- [5] Жаднов В.В. Сравнительный анализ технологий обеспечения надежности электронных средств // Инновационные информационные технологии, 2012. № 1. С. 413–418.
- [6] Жаднов В.В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем // Надежность и качество сложных систем, 2013. № 2. С. 65–73.
- [7] Кулибаба А.Я., Прищепова С.П., Штукарев А.Ю. Проблемы ускоренных испытаний электронной компонентной базы на надежность // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014. Т. 1. № 2. С. 81–85.
- [8] Матюшев Р.А., Максимов Ю.В., Патраев В.Е. Обеспечение надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования по критериям качества электронной компонентной базы. Научные технологии, 2015. Т. 16. № 3. С. 27–30.
- [9] Жаднов В.В. Расчет надежности электронных модулей. М.: Солон-Пресс, 2016. 232 с.
- [10] Архипова И.В., Батуринов А.В., Левин Р.Г., Митюшов А.И. Апробация методики оценки показателей надежности электронной компонентной базы для систем управления по результатам испытаний малых выборок ПЛИС фирмы Altera // Вопросы радиоэлектроники, 2017. № 7. С. 83–88.
- [11] Архипова И.В. Оценка показателей надежности электронной компонентной базы иностранного производства по результатам испытаний малых выборок // Вопросы радиоэлектроники, 2018. № 7. С. 59–64.
- [12] Жаднов В.В., Кулыгин В.Н. Применение метода статистического моделирования для автоматизации прогнозирования долговечности при проектировании электронных средств // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2018. № 11. С. 28–36.
- [13] Архипова И.В. Оценка надежности электронной компонентной базы с помощью методов статистического прогнозирования // Вопросы радиоэлектроники, 2019. № 6. С. 104–109.
- [14] Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
- [15] MIL-HDBK-217F. Military Handbook. Reliability prediction of electronic equipment. Washington: Department of Defense, 1991, 150 p.
- [16] Исследование и разработка методов высокоточной расчетной оценки надежности функционально сложных комплексированных электротехнических изделий: отчет о НИР, шифр «Панорама-3», 2013.
- [17] Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем // Современные проблемы науки и образования, 2015. № 1 (ч. 1) URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=17558> (дата обращения 25.03.2021).
- [18] Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Советское радио, 1975. 471 с.
- [19] Надежность электрорадиоизделий Справочник нормативного характера. М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2004. 620 с.
- [20] Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.

Сведения об авторах

Алексеев Валерий Васильевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@mail.ru

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), batyrev@bmstu.ru

Болдырев Максим Александрович — начальник отдела ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@mail.ru

Воронцов Павел Сергеевич — начальник лаборатории ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@mail.ru

Князев Роман Игоревич — зам. начальника отдела ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@mail.ru

Котов Юрий Терентьевич — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kotov46@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.04.2021.

Принята к публикации 20.05.2021.

COMPOSITION AND SUPERPOSITION FAILURES PROBABILITY DISTRIBUTION LAWS FOR ASSESSING MILITARY ELECTRICAL PRODUCTS RELIABILITY

V.V. Alekseev¹, Yu.P. Batyrev², M.A. Boldyrev¹,
P.S. Vorontsov¹, R.I. Knyazev¹, T.Yu. Kotov²

¹46 the Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia, 10, Chukotsky proezd, 129327, Moscow, Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

kotov46@inbox.ru

An implementation of the developed computational structural method for assessing the reliability of complex electrical products. The basis of this method is the use of combinations of composition and superposition laws of distribution of probabilities of failures. The estimation of reliability of a rotating transformer type BT-5. The calculated reliability indices are compared with results of standard test BT-5 for reliability. Received high convergence of the results.

Keywords: electro-technical products, product reliability, reliability indices, a block diagram of reliability, a constituent element of the product, the probability distribution of failures, the superposition law, the composition law

Suggested citation: Alekseev V.V., Batyrev Yu.P., Boldyrev M.A., Vorontsov P.S., Knyazev R.I., Kotov T.Yu. *Ispol'zovanie svoystv kompozitsii i superpozitsii zakonov raspredeleniya veroyatnostey otказov pri otsenke nadezhnosti elektrotekhnicheskikh izdeliy voennogo naznacheniya* [Composition and superposition failures probability distribution laws for assessing military electrical products reliability] // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 5, pp. 131–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-131-137

References

- [1] Zhadnov V.V., Zhadnov I.V., Poleskiy S.N. *Sovremennyye problemy avtomatizatsii raschetov nadezhnosti* [Modern problems of automation of reliability calculations]. *Nadezhnost'*, 2007, no. 2, pp. 3–12.
- [2] Borisov A.A., Isaev V.M. *O nekotorykh podkhodakh k otsenke nadezhnosti slozhnoy elektronnoy komponentnoy bazy novogo pokoleniya* [On some approaches to assessing the reliability of a complex electronic component base of a new generation]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2009, no. 3, pp. 130–134.
- [3] Baturin A.V. *Opredelenie pokazateley nadezhnosti elektronnoy komponentnoy bazy* [Determination of reliability indicators of the electronic component base]. *Peterburgskiy zhurnal elektroniki*, 2010, no. 2 (63), pp. 70–74.
- [4] Baturin A.V. *Strategiya otsenki pokazateley nadezhnosti inostrannoy EKB* [Strategy for assessing the reliability of foreign electronic components]. *Peterburgskiy zhurnal elektroniki*, 2011, no. 3–4, pp. 65–70.
- [5] Zhadnov V.V. *Sravnitel'nyy analiz tekhnologiy obespecheniya nadezhnosti elektronnykh sredstv* [Comparative analysis of technologies for ensuring the reliability of electronic means]. *Innovacionnyye informacionnyye tekhnologii*, 2012, no. 1, pp. 413–418.
- [6] Zhadnov V.V. *Raschetnaya otsenka pokazateley dolgovechnosti elektronnykh sredstv kosmicheskikh apparatov i sistem* [Calculated evaluation of the durability indicators of electronic means of spacecraft and systems]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*, 2013, no. 2, pp. 65–73.

- [7] Kulibaba A.Ya., Prishchepova S.P., Shtukarev A.Yu. *Problemy uskorennykh ispytaniy elektronnoy komponentnoy bazy na nadezhnost'* [Problems of accelerated testing of the electronic component base for reliability]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*, 2014, t. 1, no. 2, pp. 81–85.
- [8] Matyushev R.A., Maksimov Yu.V., Patraev V.E. *Obespechenie nadezhnosti bortovoy apparatury kosmicheskikh apparatov dlitel'nogo funkcionirovaniya po kriteriyam kachestva elektronnoy komponentnoy bazy* [Ensuring the reliability of the onboard equipment of long-term operation spacecraft according to the quality criteria of the electronic component base]. *Naukoemkie tehnologii*, 2015, t. 16, no. 3, pp. 27–30.
- [9] Zhadnov V.V. *Raschet nadezhnosti elektronnykh moduley* [Calculation of the reliability of electronic modules]. Moscow: Solon-Press, 2016, 232 p.
- [10] Arkhipova I.V., Baturin A.V., Levin R.G., Mityushov A.I. *Aprobatsiya metodiki otsenki pokazateley nadezhnosti elektronnoy komponentnoy bazy dlya sistem upravleniya po rezul'tatam ispytaniy malykh vyborok PLIS firmy Altera* [Approbation of the methodology for assessing the reliability of the electronic component base for control systems based on the results of tests of small samples of Altera FPGAs]. *Voprosy radioelektroniki*, 2017, no. 7, pp. 83–88.
- [11] Arkhipova I.V. *Otsenka pokazateley nadezhnosti elektronnoy komponentnoy bazy inostrannogo proizvodstva po rezul'tatam ispytaniy malykh vyborok* [Evaluation of the reliability indicators of the electronic component base of foreign production based on the results of tests of small samples]. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 7, pp. 59–64.
- [12] Zhadnov V.V., Kulygin V.N. *Primenenie metoda statisticheskogo modelirovaniya dlya avtomatizatsii prognozirovaniya dolgovechnosti pri proektirovaniy elektronnykh sredstv* [Application of the statistical modeling method for automating the durability prediction in the design of electronic devices]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy*, 2018, no. 11, pp. 28–36.
- [13] Arkhipova I.V. *Otsenka nadezhnosti elektronnoy komponentnoy bazy s pomoshch'yu metodov statisticheskogo prognozirovaniya* [Evaluation of the reliability of the electronic component base using statistical forecasting methods]. *Voprosy radioelektroniki*, 2019, no. 6, pp. 104–109.
- [14] Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2006, 702 p.
- [15] MIL-HDBK-217F. *Military Handbook. Reliability prediction of electronic equipment*. Washington: Department of Defense, 1991, 150 p.
- [16] *Issledovaniya i razrabotka metodov vysokotochnoy raschetnoy otsenki nadezhnosti funktsional'no slozhnykh kompleksirovannykh elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Research and development of methods for high-precision computational evaluation of the reliability of functionally complex integrated electrical products], shifr «Panorama-3», 2013.
- [17] Konesev S.G., Khazieva R.T. *Metody otsenki pokazateley nadezhnosti slozhnykh komponentov i sistem* [Methods for assessing the reliability indicators of complex components and systems]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 1 (p. 1). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=17558> (accessed 25.03.2021).
- [18] Kozlov B.A., Ushakov I.A. *Spravochnik po raschetu nadezhnosti apparatury radioelektroniki i avtomatiki* [Handbook for calculating the reliability of radio electronics and automation equipment]. Moscow: Sovetskoe radio, 1975, 471 p.
- [19] *Nadezhnost' elektroradioizdeliy Spravochnik normativnogo kharaktera* [Reliability of electrical and radio components]. Spravochnik. Moscow: 22 TsNIII MO RF, 2004, 620 p.
- [20] Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in the theory of reliability]. Moscow: Nauka, 1965, 524 p.

Authors' information

Alekseev Valery Vasilievich — Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher, branch FGBU «46CNII» Ministry of Defence, hit-el@mail.ru

Batyrev Yuriy Pavlovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), batyrev@mgul.ac.ru

Boldyrev Maksim Aleksadrovich, — Senior scientific employee of branch FGBU «46CNII» Ministry of Defence of Russia, hit-el@ya.ru

Vorontsov Pavel Sergeevich, — Scientific employee of branch FGBU «46CNII» Ministry of Defence of Russia, hit-el@ya.ru

Knyazev Roman Igorevich — Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher, branch FGBU «46CNII» Ministry of Defence, hit-el@mail.ru

Kotov Yuriy Terentievich — Dr. Sci. (Tech.) Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), kotov46@inbox.ru

Received 17.04.2021.

Accepted for publication 20.05.2021.