

10. Czech P., Lazarz B., Madej H., Wojnar G. Vibration diagnosis of car motor engines, *Acta technica corviniensis – bulletin of engineering*, 2010.
11. Scheffer C., Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance, *Newnes*, 2004.
12. Patel V.N., Tandon N., Pandey R. K. Hindawi publishing corporation advances in acoustics and vibration, *Experimental study for vibration behaviors of locally defective deep groove ball bearings under dynamic radial load*, 2014.
13. Burdzik R., Doleček R. Research of vibration distribution in vehicle constructive, *Perner's contacts*, 2012, pp. 16-26.
14. Wang, X. Vehicle noise and vibration refinement, woodhead publishing limited, Cambridge, 2010.
15. Deulgaonkar, V.R. Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles, *International journal of modern engineering research (IJMER)*, Vol. 1, No. 2, pp-242-246.
16. Zhereintsev I.A., Glushkov S.V., Zhereintseva N.N. Neyrosetevaya metodika tekhnicheskoy diagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya po spektral'nomu analizu shumovykh kharakteristik [Neural network technique of technical diagnostics of internal combustion engines by spectral analysis of noise characteristics], *Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Maritime State University], 2010, No. 37.
17. Patrick Sincebaugh, William Green. A neural network based diagnostic test system for armored vehicle shock absorbers expert systems with applications, 1996, Vol. 11, No. 2, pp. 237-244.
18. Krug P.G. Neyronnye seti i neyrokomp'yutery: ucheb. posobie po kursu «Mikroprotsessory» [Neural networks and neurocomputers: a textbook on the course "Microprocessors"]. Moscow: Izd-vo MEI, 2002.
19. Burakov M.V. Neyronnye seti i neyrokontrollery: ucheb. posobie [Neural networks and neurocontrollers: a textbook]. Saint Petersburg: GUAP, 2013.
20. Gafarov F.M. Iskusstvennye neyronnye seti i prilozheniya: ucheb. Posobie [Artificial neural networks and applications: a textbook]. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 2018.
21. Vakulenko S.A., Zhikhareva A.A. Prakticheskiy kurs po neyronnym setyam [Practical course on neural networks]. Saint Petersburg, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.И. Дордопуло.

Логунов Артём Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79054586468; аспирант.

Береснев Алексей Леонидович – e-mail: alex_tr6@mail.ru; кафедра электротехники и механики; к.т.н.; доцент.

Logunov Artem Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054586468; postgraduate.

Beresnev Alexey Leonidovich – e-mail: alex_tr6@mail.ru; the departments of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 629.07.017

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-170-180

А.С. Болдырев, Л.С. Вережкина, А.Л. Вережкин

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ОТКАЗОБЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ И АГРЕГАТОВ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ГРУППЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Областями применения CALS-технологий принято считать: совершенствование деятельности в области разнородных процессов, происходящих на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) продукции; управление цепочками поставок в течение всего ЖЦ продукции (от создания концепции изделия до его утилизации); электронная интеграция организаций

(предприятий), участвующих в этих процессах на различных этапах ЖЦ; управление поддержкой ЖЦ продукции. Одними из актуальных направлений развития в авиационной отрасли являются: мультиагентные технологии повышения эффективности летательных аппаратов (ЛА разного типа в группе и единой миссии) и CALS-технологии. В статье предложена методика анализа отказобезопасности систем и агрегатов мультиагентной группы ЛА в целом, по типам ЛА, их системам, агрегатам. Методика дана на примере статистических данных АП и ПАП 16 систем: пилотажно-навигационной, выхлопа, зажигания, топливной, управления, электроснабжения, кондиционирования; гидравлической, радиоаппаратуры связи, приборов контроля, и агрегатов: двигатель, воздушные винты, крылья, окна, фонарь, десяти самолетов Ан-2, Л-410, Як-40, Ан-24, Ту-134, Як-42, Ту-154, Ил-62, Ил-62М, Ил-86. В предложенной методике анализа статистических данных АП и ПАП используются преобразования с матрицами, которые позволяют не ограничиваться числом систем, агрегатов, и самих ЛА. Рассчитано время работы до функционального отказа систем и агрегатов по типам ЛА. Определена средняя вероятность функционального отказа каждой из систем и агрегатов в мультиагентной группе, и время до функционального отказа в целом мультиагентной группы из 10 ЛА, которое составило 132,5 часа и определено, что ПАП и АП с большей вероятностью произойдут с шасси и двигателем ЛА. Приведенная методика позволяет: соотносить количественные требования по надежности к системам и агрегатам с учетом случайных факторов и факторов неопределенности; давать оценку выполнимости установленных требований к надежности; проводить сравнительный анализ и обоснование выбора рационального варианта состава группы ЛА.

Летательные аппараты; анализ отказобезопасности; мультиагентная группа; матрицы; вероятность функционального отказа.

A.S. Boldyrev, L.S. Verevkin, A.L. Verevkin

METHODOLOGY FOR ANALYZING THE FAULT SAFETY OF SYSTEMS AND AGGREGATES OF A MULTI-AGENT GROUP OF AIRCRAFT

Areas of application of CALS technologies are considered to be: improvement of activities in the field of heterogeneous processes occurring at all stages of the life cycle (LC) of products; supply chain management throughout the entire LC of products (from the creation of the product concept to its disposal); electronic integration of organizations (enterprises) involved in these processes at various stages of LC; management of support for LC products. One of the most relevant areas of development in the aviation industry are: multi-agent technologies for improving the efficiency of aircraft (aircraft of various types in a group and a single mission) and CALS technologies. The article proposes a methodology for analyzing the fault safety of systems and aggregates of the multi-agent group of aircraft as a whole, by types of aircraft, their systems, and aggregates. The methodology is given on the example of statistical data of AP and PAP 16 systems: flight navigation, exhaust, ignition, fuel, control, power supply, air conditioning; hydraulic, radio communication equipment, control devices, and aggregates: engine, propellers, wings, windows, lantern, ten aircraft AN-2, L-410, Yak-40, An-24, Tu-134, Yak-42, Tu-154, IL-62, IL-62M, IL-86. In the proposed methodology for analyzing statistical data of AP and PAP, transformations with matrices are used, which allow not to be limited to the number of systems, aggregates, and the aircraft themselves. The operating time before the functional failure of systems and aggregates by types of aircraft was calculated, the average probability of functional failure of each of the systems and aggregates in a multi-agent group was determined, and the time before the functional failure of a multi-agent group of 10 aircraft as a whole, which was 132.5 hours, and it was determined that PAP and AP are more likely to occur with the chassis and engine of the aircraft. The given methodology allows: to correlate quantitative reliability requirements for systems and aggregates, taking into account random factors and uncertainty factors; to assess the feasibility of the established reliability requirements; to conduct a comparative analysis and justification of the choice of a rational variant of the composition of the aircraft group.

Aircraft; fault safety analysis; multi-agent group; matrices; probability of functional failure.

Введение. CALS-технологии позволяют совершенствовать деятельность в разных областях и процессах, на всех этапах жизненного цикла изделий – от создания до их утилизации и способствует интеграции предприятий, участвующих на различных стадиях жизненного цикла изделий [1–3].

CALS-технологии (англ. Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий), или ИПИ (информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий) [4].

Единое информационное пространства CALS-технологий [5], приведенное на рис. 1 формируется статистическими исследованиями на всех стадиях жизненного цикла ЛА различными организациями требованиями нормативных документов [6–9].

Основная часть исследований посвящена обеспечению надёжности планера самолета при техническом обслуживании и ремонте [10–14]. Однако инвесторов авиационной техники интересует не только отказы – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния системы самолета, а и возможные авиационные происшествия (АП - аварии и катастрофы), предпосылки к АП (ПАП). В соответствии с перечнем ПАП [15], к ним относятся: выход параметров за пределы эксплуатационных ограничений; возникновение в полете отказов авиационной техники, приводящих к особой (сложной, аварийной) ситуации; потерю навигационной ориентировки; потерю пространственной ориентировки; потерю радиосвязи и другие.



Рис. 1. CALS-технологии

Постановка задачи. Одними из новых направлений развития в авиационной отрасли являются: мультиагентные технологии повышения эффективности ЛА, когда группа разных ЛА объединены одной миссией. Статистика ПАП и АП используется при анализе отказобезопасности ЛА. В.2 ОСТ 1 00497-97 «Надежность изделий авиационной техники. Методы оценки и анализа показателей надежности самолетов (вертолетов) при их эксплуатации» является вероятностью вида отказа (функционального отказа) системы на 1 час полета q_0 . Согласно п. 5.1.9 ОСТ 1 00497-97 определяется по формуле [16]:

$$q_0 = m_0 / t_C, \quad (1)$$

где m_0 – суммарное количество отказов, приведших к определенному нарушению работоспособности функциональной системы, характеризующему частичной или полной потерей способности выполнять одну или несколько функций; t_C – суммарный налет ЛА за расчетный период.

В работах приведены методы статистического анализа [17] и использование матриц [18] статье предложена актуальная методика анализа отказобезопасности мультиагентной группы ЛА на примере численного анализа отказобезопасности 16 систем и агрегатов 10 самолетов, по статистическим данным, как в целом, так и по типам системам, и системам.

При известных статистических показателях безопасности полетов – налет на одно АП, предпосылку к АП в результате анализа отказобезопасности систем и агрегатов – можно прогнозировать более точно мероприятия технического обслуживания ЛА. В табл. 1 приведены исходные данные – относительное число ПАП, вызванных отказами систем в процентах за 1000 часов налета [19].

Таблица 1

Относительное число АП и ПАП самолетов за 1000 часов налета

Система, агрегат	Ан-2	Л-410	Як-40	Ан-24	Ту-134	Як-42	Ту-154	Ил-62	Ил-62М	Ил-86
Система кондиционирования			4,43		7,30					
Радиоаппаратура связи	5,56									
Система электроснабжения	9,11	5,64			3,93				4,30	
Система управления самолета				3,29		22,00		6,67		
Гидравлическая система		5,64	4,93	3,95	7,87					10,53
Шасси		42,96	54,66	21,05	36,5	12,00	31,7	6,67	11,8	37,71
Пилотажно-навигационная								6,67	4,30	
Фонарь, окна					4,49					
Крыло						10,00				
Воздушные винты				12,50						
Двигатель	54,00	16,20	7,39	12,50	11,80	28,00	25,43	21,66	40,85	19,30
Топливная система двигателя				5,26					4,30	7,89
Система зажигания	5,33									
Приборы контроля работы двигателя		6,34		11,18			15,67			
Система выхлопа (реверс)								33,33		13,97
Навигационная радиоаппаратура			5,43	6,58	3,93					

Методика анализа отказобезопасности систем и агрегатов группы ЛА

1. Из табл. 1 по исходным данным ПАП и АП в процентах составляем матрицу их $||n||$ размером $i \times j=16 \times 10$, где: $i=16$ систем; $j=10$ самолетов:

$$|n| = \begin{vmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1j} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{210} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{i1} & n_{i2} & \dots & n_{ij} \end{vmatrix} =$$

0	0	4,43	0	7,3	0	0	0	0	0
5,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,11	5,64	0	0	3,93	0	0	0	4,3	0
0	0	0	3,29	0	22	0	6,67	0	0
0	5,64	4,93	3,95	7,87	0	0	0	0	10,53
0	42,96	54,66	21,05	36,52	12	31,7	6,67	11,82	37,71
0	0	0	0	0	0	0	6,67	4,3	0
0	0	0	0	4,49	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
0	0	0	12,5	0		0	0	0	0
54	16,2	7,39	12,5	11,8	28	25,43	21,66	40,85	19,3
0	0	0	5,26	0	0	0	0	4,3	7,89
5,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	6,34	0	11,18	0	0	15,67	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	33,33	0	13,97
0	0	5,43	6,58	3,93	0	0	0	0	0
74	76,78	76,84	76,31	75,84	72	72,8	75	65,57	89,4

Так как число n_{ij} (например для $n_{13}=4,43\%$) в процентах из $N=100\%$ систем за $t=1000$ часов налета можно рассчитать вероятность вида функционального отказа системы q_{ij} , которая определяется по формуле:

$$q_{ij} = n / (N * t) = n / (100 * 1000) = n * 10^{-5}. \quad (2)$$

Например для третьего самолета вероятность функционального отказа системы кондиционирования $q_{13}=4,43/(100*1000)=4,43*10^{-5}$ 1/час, а для всех систем одновременно рассчитывают матрицу.

2 Матрицу вероятностей функционального отказа $\|q_{ij}\|$ систем и агрегатов самолетов получаем умножив матрицу $|n|$ на 10^{-5} определено в формуле (2):

$$\|q_{ij}\| = \|n\| * 10^{-5} =$$

0	0	4,43*10 ⁻⁵	0	7,3*10 ⁻⁵	0	0	0	0	0
5,56*10 ⁻⁵	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,11*10 ⁻⁵	5,64*10 ⁻⁵	0	0	3,93*10 ⁻⁵	0	0	0	4,3*10 ⁻⁵	0
0	0	0	3,29*10 ⁻⁵	0	22*10 ⁻⁵	0	6,67*10 ⁻⁵	0	0
0	5,64*10 ⁻⁵	4,93*10 ⁻⁵	3,95*10 ⁻⁵	7,87*10 ⁻⁵	0	0	0	0	10,5*10 ⁻⁵
0	42,96*10 ⁻⁵	54,66*10 ⁻⁵	21,05*10 ⁻⁵	36,52*10 ⁻⁵	12*10 ⁻⁵	31,7*10 ⁻⁵	6,67*10 ⁻⁵	11,82*10 ⁻⁵	37,7*10 ⁻⁵
0	0	0	0	0	0	0	6,67	4,3	0
0	0	0	0	4,49*10 ⁻⁵	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
0	0	0	12,5*10 ⁻⁵	0		0	0	0	0
54*10 ⁻⁵	16,2*10 ⁻⁵	7,39*10 ⁻⁵	12,5*10 ⁻⁵	11,8*10 ⁻⁵	28*10 ⁻⁵	25,43*10 ⁻⁵	21,66*10 ⁻⁵	40,85*10 ⁻⁵	19,3*10 ⁻⁵
0	0	0	5,26*10 ⁻⁵	0	0	0	0	4,3*10 ⁻⁵	7,89*10 ⁻⁵
5,33*10 ⁻⁵	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	6,34*10 ⁻⁵	0	11,18*10 ⁻⁵	0	0	15,67*10 ⁻⁵	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	33,33*10 ⁻⁵	0	13,9*10 ⁻⁵
0	0	5,43*10 ⁻⁵	6,58*10 ⁻⁵	3,93*10 ⁻⁵	0	0	0	0	0

3. Определяем время работы в часах до функционального отказа систем и агрегатов самолетов в виде матрицы $\|T_{ij}\|$, возведя в минус первую степень матрицу $\|q_{ij}\|$ систем и агрегатов:

$$\|T_{ij}\| = \|q_{ij}\|^{-1}.$$

Врем работы T_{ij} до функционального отказа систем и агрегатов по типам ЛА приведено в табл. 2.

Таблица 2

Врем работы до функционального отказа систем и агрегатов по типам ЛА

Наименование системы	T_{ij} , час.									
	Ан-2	Л-410	Як-40	Ан-24	Ту-134	Як-42	Ту-154	Ил-62	Ил-62М	Ил-86
Система кондиционирования	-	-	22573	-	13699	-	-	-	-	-
Радиоаппаратура связи	17986	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Система электроснабжения	10977	17730	-	-	25445	-	-	-	23256	-
Система управления самолета	-	-	-	30395	-	4545	-	14992	-	-
Гидравлическая система	-	17730	20284	25316	12706	-	-	-	-	9497
Шасси	-	2328	1829	4651	2738	8333	3155	14992	8460	2652
Пилотажно-навигационная	-	-	-	-	-	-	-	14992	23256	-
Фонарь, окна	-	-	-	-	22272	-	-	-	-	-
Крыло	-	-	-	-	-	10000	-	-	-	-
Воздушные винты	-	-	-	8000	-	-	-	-	-	-
Двигатель	1852	6173	13531	8000	8475	3571	3932	4617	2448	5181
Топливная система двигателя	-	-	-	19011	-	-	-	-	23256	12674
Система зажигания	18762	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Приборы контроля работы двигателя	-	15773	-	8945	-	-	6381	-	-	-
Система выхлопа (реверс)	-	-	-	-	-	-	-	3000	-	7158
Навигационная радиоаппаратура	17985	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4. Определяем среднюю вероятность функционального отказа $\|q_{i\text{cp}}\|$ каждого наименования систем и агрегатов в мультиагентной группе. Матрицу ПАП и АП $\|n_{ij}\|$ умножим на матрицу в один столбец с числом строк равном $j=10$ числу самолетов (так как число отказов n в процентах из $N=100\%$ систем 10 самолетов за $t=1000$ часов налета) $a=10^{-5}$:

$$\|q_{i\text{cp}}\| = \|n_{ij}\| * \|a_j\| =$$

$$= \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1j} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{i1} & n_{i2} & \dots & n_{ij} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \\ 10^{-5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{1\text{cp}} \\ q_{2\text{cp}} \\ \dots \\ q_{16\text{cp}} \end{pmatrix} \text{ получим } \begin{pmatrix} 11,73 * 10^{-5} \\ 5,56 * 10^{-5} \\ 22,98 * 10^{-5} \\ 31,96 * 10^{-5} \\ 32,92 * 10^{-5} \\ 255,09 * 10^{-5} \\ 10,97 * 10^{-5} \\ 4,49 * 10^{-5} \\ 10 * 10^{-5} \\ 12,5 * 10^{-5} \\ 237,13 * 10^{-5} \\ 17,45 * 10^{-5} \\ 5,33 * 10^{-5} \\ 33,19 * 10^{-5} \\ 47,3 * 10^{-5} \\ 15,94 * 10^{-5} \end{pmatrix} \text{ 1/ч}$$

5. Определяем матрицу среднего времени работы до функционального отказа в часах, для каждого наименования систем и агрегатов возведя в минус первую степень матрицу $\|q_{i\text{cp}}\|$:

$$\|T_{i\text{гр}}\| = \|q_{i\text{cp}}\|^{-1} = \begin{pmatrix} T_{1\text{гр}} \\ T_{2\text{гр}} \\ \dots \\ T_{16\text{гр}} \end{pmatrix}, \quad \|T_{i\text{гр}}\| = \begin{pmatrix} 8225,2 \\ 17985,6 \\ 4351,6 \\ 3128,9 \\ 3037,7 \\ 392,0 \\ 9115,7 \\ 22271,7 \\ 10000,0 \\ 8000,0 \\ 421,7 \\ 5730,6 \\ 18761,7 \\ 3012,9 \\ 2114,2 \\ 6273,5 \end{pmatrix} \text{ час}$$

Если ранжировать полученные результаты, можно наглядно представить наиболее уязвимые системы при выполнении миссии десятью самолетами. Результаты ранжированных среднего значения времени работы до функционального отказа $T_{i\text{гр}}$ систем и агрегатов мультиагентной группы из 10 самолетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Ранжированные среднего значения времени работы до функционального отказа системы

Номер системы в исходных данных	Агрегат (система) ЛА	T, час
6	Шасси	392
11	Двигатель	422
15	Система выхлопа (реверс)	2114
14	Приборы контроля работы двигателя	3013
5	Гидравлическая система	3038
4	Система управления самолета	3129
3	Система электроснабжения	4352
12	Топливная система двигателя	5731
16	Навигационная радиоаппаратура	6273,5
10	Воздушные винты	8000
1	Система кондиционирования	8225
7	Пилотажно-навигационная система	9117
9	Крыло	10000
9	Радиоаппаратура связи	17986
13	Система зажигания	18762
8	Фонарь, окна	22272

Методика анализа отказобезопасности мультиагентной группы ЛА в целом. Вероятность функционального отказа в целом в мультиагентной группе ЛА можно определить преобразованием - матрицу $\|q_{i\text{cp}}\|$ транспортируем и умножим ее на единичную матрицу столбец с числом строк равным числу $i=16$ всех систем:

$$Q_{\text{гр}} = \|q_{i\text{cp}}\|^T * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{1\text{cp}} \\ q_{2\text{cp}} \\ \dots \\ \dots \\ q_{16\text{cp}} \end{pmatrix}^T * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} = \|q_{1\text{cp}}q_{2\text{cp}} \dots \wedge q_{16\text{cp}}\| * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$Q_{\text{гр}} = 754,54 * 10^{-5} 1/\text{ч}$$

Определим времени до функционального отказа систем $T_{\text{гр}}$ в мультиагентной группы ЛА

$$T_{\text{гр}} = 1/\wedge_{\text{гр}} \text{ в численном примере } T_{\text{гр}} = 1/754,54 = 132,53 \text{ час}$$

Из приведенных расчетов можно сделать вывод, что для мультиагентной группы ЛА из 10 самолетов, при выполнении одной миссии, времени до функционального отказа 132,53 час, самыми ненадежными являются у самолётов шасси и двигатель, что подтверждается в публикациях [20]

Заключение. Приведенная методика анализа отказобезопасности систем и агрегатов мультиагентной группы ЛА по статистическим данным АП и ПАП позволяет:

- ◆ соотносить количественные требования по надежности к системам и агрегатам с учетом случайных факторов и факторов неопределенности;
- ◆ давать оценку выполнимости установленных требований к надежности;
- ◆ проводить сравнительный анализ и обоснование выбора рационального варианта состава группы ЛА;
- ◆ давать оценку функциональных возможностей;
- ◆ обоснование прогноза, технического обслуживания и ремонта систем ЛА, с целью повышения надежности;
- ◆ решение различных оптимизационных задач, мультиагентного группового использования.

Следует отметить, что метод анализа отказобезопасности систем и агрегатов мультиагентной группы ЛА по статистическим данным АП и ПАП посредством преобразований с матрицами, позволяют не ограничиваться числом систем, агрегатов, и самих ЛА. Результаты численного компьютерного моделирования отказобезопасности систем и агрегатов мультиагентной группы ЛА позволяют принимать обоснованные решения всем участникам единого информационного пространства CALS-технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <https://www.metobr-expo.ru/ru/ui/17007/>.
2. Юрчик П.Ф., Голубкова В.Б. Применение Web и CALS технологий на предприятии: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2018. – 112 с.
3. Акилова И.М., Бушманов А.В. CALS-технологии // Сб. учебно-методических материалов для направления подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017. – 59 с.
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki/CALS-технологии>.
5. <https://studfile.net/preview/4325131/page:4/>.
6. Викторова В.С., Ведерников Б.И., Спиридонов И.Б., Степаняц А.С. Моделирование и анализ контролепригодности бортовых систем самолетов // Надежность. – 2007. – № 3 (22). – С. 62-71.
7. ОСТ 1 00132-97. Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов.
8. Смирнов Н.Н., Андронов А.М., Владимиров Н.И., Лемин Ю.И. Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов. – М.: Транспорт, 1974. – 304 с.
9. Фролов В.П. Проблемы авиаремонтного производства в повышении эффективности использования ЛА и безопасности полетов // Методологические проблемы эксплуатации ЛА и обеспечения безопасности полетов: Матер. научных докладов научно-практической конференции МИИГА. – М.: РИО МИИГА, 1991. – С. 34-41.
10. Шапкин В.С. Расчетно-экспериментальная оценка длительности развития усталостных трещин в тонкостенных элементах авиаконструкций при нерегулярном нагружении: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1989. – 202 с.
11. Ормоцадзе А.Р. Совершенствование технологического процесса ремонта агрегатов планера самолетов гражданской авиации с эксплуатационными повреждениями: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1997. – 422 с.
12. Шапкин В.С. Влияние основных факторов эксплуатации на характеристики долговечности и ресурса длительно эксплуатируемых воздушных судов и разработка методов их оценки применительно к элементам конструкции планера: дисс. ... д-ра техн. наук. – М.: 1995. – 501 с.
13. ОСТ 1 00497-97 Надежность изделий авиационной техники. Методы оценки и анализа показателей надежности самолетов (вертолетов) при их эксплуатации. – 13 с.

14. ГОСТ 27.310-95 Анализ видов, последствий и критичности отказов. – 14 с.
15. <http://ooobskspetsavia.ru/2015/10/09/predposylki-i-prichiny-aviacionnykh-proisshествij/>.
16. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности: Основные характеристики надежности и их статистический анализ. – 2-е изд. – М.: URSS, 2013. – 584 с.
17. Болдырев А.С., Вережкин А.Л., Пилюхилова К.В., Вережкина Л.С. Методика и моделирование надежности системы группового управления роботизированными платформами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4 (152). – С. 87-101.
18. <http://lektii.net/4-18471.html> - Гражданской авиации.
19. http://airforce.ru/aircraft/miscellaneous/ejectionseats/tu/tu-22_accidents.htm.
20. <https://szmtu-m.favt.ru/public/files/2017/02/НИР2016.pdf>.

REFERENCES

1. Available at: <https://www.metobr-expo.ru/ru/ui/17007/>.
2. Yurchik P.F., Golubkova V.B. *Primenenie Web i CALS tekhnologiy na predpriyatii: ucheb. posobie* [The use of Web and CALS technologies in the enterprise: a textbook]. Moscow: MADI, 2018, 112 p.
3. Akilova I.M., Bushmanov A.V. *CALS-tekhnologii* [CALS-technologies], *Sb. uchebno-metodicheskikh materialov dlya napravleniya podgotovki 09.03.01 «Informatika i vychislitel'naya tekhnika»* [Collection of educational and methodological materials for the direction of training 09.03.01 "Computer Science and computer engineering"]. Blagoveshchensk: Amurskiy gos. un-t, 2017, 59 p.
4. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CALS-tekhnologii> [<https://ru.wikipedia.org/wiki/CALS-technologies>].
5. Available at: <https://studfile.net/preview/4325131/page/4/>.
6. Viktorova V.S., Vedernikov B.I., Spiridonov I.B., Stepanyants A.S. *Modelirovanie i analiz kontroleprigodnosti bortovykh sistem samoletov* [Modeling and analysis of the controllability of aircraft onboard systems], *Nadezhnost'* [Reliability], 2007, No. 3 (22), pp. 62-71.
7. OST 1 00132-97. *Nadezhnost' izdeliy aviatsionnoy tekhniki. Metody kolichestvennogo analiza bezotkaznosti funktsional'nykh sistem pri proektirovanii samoletov i vertoletov* [OST 1 00132-97. Reliability of aircraft products. Methods of quantitative analysis of the reliability of functional systems in the design of aircraft and helicopters].
8. Smirnov N.N., Andronov A.M., Vladimirov N.I., Lemin Yu.I. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' i rezhimy tekhnicheskogo obsluzhivaniya samoletov* [Operational reliability and maintenance modes of aircraft]. Moscow: Transport, 1974, 304 p.
9. Frolov V.P. *Problemy aviaremontnogo proizvodstva v povyshenii effektivnosti ispol'zovaniya LA i bezopasnosti poletov* [Problems of aircraft repair production in improving the efficiency of aircraft use and flight safety], *Metodologicheskie problemy ekspluatatsii LA i obespecheniya bezopasnosti poletov: Mater. nauchnykh dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii MIIGA* [Methodological problems in operation of the LA and aviation safety: Proceedings of the scientific reports of the international scientific-practical conference MIIGA]. Moscow: RIO MIIGA, 1991, pp. 34-41.
10. Shapkin V.S. *Raschetno-eksperimental'naya otsenka dlitel'nosti razvitiya ustalostnykh treshchin v tonkostennykh elementakh aviakonstruktsiy pri neregulyarnom nagruzhении*: diss. ... kand. tekhn. nauk [Calculation-experimental estimate of the duration of development of fatigue cracks in thin-walled elements of aviakonstruktur under irregular loading: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow, 1989, 202 p.
11. Ormotsadze A.R. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo protsessa remonta agregatov planera samoletov grazhdanskoй aviatsii s ekspluatatsionnymi povrezhdeniyami*: diss. ... kand. tekhn. nauk [Calculation-experimental estimate of the duration of development of fatigue cracks in thin-walled elements of aviakonstruktur under irregular loading: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow, 1997, 422 p.
12. Shapkin V.S. *Vliyanie osnovnykh faktorov ekspluatatsii na kharakteristiki dolgovechnosti i resursa dlitel'no ekspluatiruemykh vozdushnykh sudov i razrabotka metodov ikh otsenki primenitel'no k elementam konstruktsii planera*: diss. ... d-ra tekhn. nauk [The influence of the main factors of operation on the characteristics of durability and resource of long-operated aircraft and the development of methods for their evaluation in relation to the elements of the airframe design: dr. of eng. sc. diss.]. Moscow: 1995, 501 p.

13. OST 1 00497-97 Nadezhnost' izdeliy aviatsionnoy tekhniki. Metody otsenki i analiza pokazateley nadezhnosti samoletov (vertoletov) pri ikh ekspluatatsii [OST 1 00497-97 Reliability of aircraft products. Methods of evaluation and analysis of reliability indicators of aircraft (helicopters) during their operation], 13ps.
14. GOST 27.310-95 Analiz vidov, posledstviy i kritichnosti otkazov [GOST 27.310-95 Analysis of the types, consequences and criticality of failures], 14 p.
15. Available at: <http://oobskspetsavia.ru/2015/10/09/predposylki-i-prichiny-aviacionnyx-proisshestvij/>.
16. *Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D.* Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti: Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz [Mathematical methods in the theory of reliability: The main characteristics of reliability and their statistical analysis]. 2nd ed. Moscow: URSS, 2013, 584 p.
17. *Boldyrev A.S., Verevkin A.L., Pshikhopova K.V., Verevkina L.S.* Metodika i modelirovanie nadezhnosti sistemy gruppovogo upravleniya robotizirovannymi platformami [Methodology and modeling of reliability of a group control system for robotic platforms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (152), pp. 87-101.
18. Available at: <http://lektsii.net/4-18471.html> - Grazhdanskoy aviatsii [<http://lektsii.net/4-18471.html> - Civil aviation].
19. Available at: http://airforce.ru/aircraft/miscellaneous/ejectionseats/tu/tu-22_accidents.htm.
20. Available at: <https://szmtu-m.favt.ru/public/files/2017/02/НИР2016.pdf>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.Ю. Медведев.

Болдырев Антон Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: boldyrev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371634; Институт радиотехнических систем и управления; директор; к.т.н.

Веревкин Александр Леонидович – e-mail: verevkin.a@mail.ru; тел. +78634371634; кафедра летательных аппаратов; аспирант.

Веревкина Лина Станиславовна – e-mail: lverevkina@sfedu.ru; тел. +78634371697; к.т.н.; доцент.

Boldyrev Anton Sergeevich – Southern Federal University; boldyrev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; Institute of Radio Engineering Systems and Control; director; cand. of eng. sc.

Verevkin Alexander Leonidovich – e-mail: verevkin.a@mail.ru; phone: +78634371634; the department of aircraft; graduate student.

Verevkina Lina Stanislavovna – e-mail: lverevkina@sfedu.ru; phone: +78634371697; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.315.611

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-180-194

М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович, Д.В. Бурьков

ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ РАЗРУШЕНИЯ И ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СПЭ КАБЕЛЕЙ

Статья посвящена исследованиям вопросов по созданию метода оценки долговечности основной изоляции силовых кабельных линий на основе термофлуктуационной теории разрушения твердых тел. Рассмотрены особенности развития пробоя в однородных и неоднородных диэлектриках. Рассматриваются проблемные вопросы изоляционных материалов силовых кабельных систем (СКС) на основе разработки и развития методов неразрушающего контроля. Установлены основные компоненты, разрушающие изоляцию СКС. Описана термофлуктуационная теория разрушения и оценка долговечности электрической изоляции силовых кабелей. Предлагается аналитический метод оценки процессов окисления целлюлозы с определением наиболее вероятного. Предложенный подход выявления основ-