

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-61-72>

Подходы к определению остаточного ресурса основных узлов вертолёта с учётом выполненных профилей полёта

И. И. Сизонов¹ ✉, А. С. Барабушка², И. Е. Мухин¹

¹ Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² АО НЦВ «Миль и Камов

ул. Авиаконструктора Милия, д. 15, г. Москва 109431, Российская Федерация

✉ e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

Резюме

Цель исследования – разработка альтернативного подхода к определению остаточного ресурса изделия, основанного на преобразовании энергии деформированных силовых элементов конструкции планера в расход эквивалентного ресурса изделия посредством системы мониторинга на базе оптоволоконных датчиков деформации.

Методы. Выполнен анализ существующих методов оценки технического состояния основных узлов изделий авиационной техники и определения их остаточного ресурса исходя из сведений о техническом состоянии, на основании чего осуществлен синтез алгоритма определения остаточного ресурса основных узлов вертолёта с учётом технического состояния.

Результаты. В процессе исследования были классифицированы существующие методы оценки технического состояния изделия. Указаны недостатки в существующей концепции определения остаточного ресурса, основным из которых является отсутствие возможности прогнозирования остаточного ресурса на основании технического состояния объекта (истории эксплуатации). Предложен альтернативный подход к определению остаточного ресурса основных узлов вертолёта с пояснением примерной методики оценки технического состояния основных узлов и изделия в целом, состав и описание основных этапов внедрения данного подхода. Определены состав и чувствительный элемент в системе контроля текущего технического состояния основных узлов изделия. В качестве чувствительного элемента для реализации системы мониторинга выбран оптоволоконный датчик с решёткой Брэгга (оптоволоконный датчик давления ВОДД-1.ХХХ ПИКВ.401143.003 ТУ).

Заключение. Предложенный подход к определению остаточного ресурса основных узлов вертолёта сочетает в себе высокие показатели достоверности, что обусловлено фиксацией истории эксплуатации конкретного вертолёта, простоту определения остаточного ресурса изделия и отсутствие необходимости специальных средств измерений в эксплуатирующих компаниях.

Ключевые слова: назначенный ресурс; эквивалентный ресурс; датчик напряжённо-деформирования состояния; волоконно-оптический датчик давления; система мониторинга; критичный элемент конструкции.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Сизонов И. И., Барабушка А. С., Мухин И. Е. Подходы к определению остаточного ресурса основных узлов вертолёта с учётом выполненных профилей полёта // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 13, № 1. С. 61–72. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-61-72>.

Поступила в редакцию 20.01.2023

Подписана в печать 14.02.2023

Опубликована 30.03.2023

Approaches to Determining the Residual Life of the Main Components of the Helicopter, Taking Into Account the Flight Profiles Performed

Ivan I. Sizonov¹ ✉, Alexander S. Barabushka², Ivan E. Mukhin¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² JSC NCV "Mil" i Kamov"

15 Aviakonstruktora Str., Moscow 109431, Russian Federation

e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is development of an alternative approach to determining the residual life of the product, based on the conversion of the energy of deformed power elements of the airframe structure into the consumption of an equivalent product resource through a monitoring system based on fiber-optic strain sensors.

Methods. The analysis of existing methods for assessing the technical condition of the main components of aircraft products and determining their residual life based on information about the technical condition, on the basis of which the synthesis of the algorithm for determining the residual life of the main components of the helicopter, taking into account the technical condition, was carried out.

Results. In the course of the study, the existing methods of assessing the technical condition of the product were classified. The shortcomings in the existing concept of determining the residual resource are indicated, the main of which is the lack of the possibility of predicting the residual resource based on the technical condition of the object (operational history). An alternative approach to determining the residual life of the main components of the helicopter is proposed, with an explanation of the approximate methodology for assessing the technical condition of the main components and the product as a whole, the composition and description of the main stages of the implementation of this approach. The composition and the sensitive element in the control system of the current technical condition of the main components of the product are determined. A fiber-optic sensor with a Bragg grid (fiber-optic pressure sensor ВОДД-1.XXX ПИКВ.401143.003 ТУ) was selected as a sensitive element for the implementation of the monitoring system.

Conclusion. The proposed approach to determining the residual life of the main components of the helicopter combines high reliability indicators, which is due to the fixation of the operation history of a particular helicopter, the simplicity of determining the residual life of the product and the absence of the need for special measuring instruments in operating companies.

Keywords: assigned resource; equivalent resource; stress-strain state sensor; fiber-optic pressure sensor; monitoring system; critical structural element.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Sizonov I. I., Barabushka A. S., Mukhin I. E. Approaches to Determining the Residual Life of the Main Components of the Helicopter, Taking Into Account the Flight Profiles Performed. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(1): 61–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-61-72>.

Received 20.01.2023

Accepted 14.02.2023

Published 30.03.2023

Введение

Современные изделия авиационной промышленности независимо от их назначения характеризуются рядом показателей, регламентирующих порядок эксплуатации и последующих ремонтов. Одним из таких показателей является назначенный ресурс, по истечении которого эксплуатация изделия должна быть прекращена независимо от его фактического технического состояния, а возможность дальнейшей эксплуатации определяется отдельным решением [1]. При этом следует понимать, что оформление такого решения – процесс длительный и трудоёмкий. Кроме того, предприятие-изготовитель не заинтересовано в продлении срока эксплуатации на собственное изделие, поскольку это снижает спрос, а следовательно, и прибыль.

Альтернативой вышеописанному подходу служит эксплуатация изделия и его списание по техническому состоянию, т. е. на основании показателей износа узлов объекта без учета сроков эксплуатации. Отметим, что это целесообразно только для механических узлов (например, деталей обшивки планера, несущей конструкции фюзеляжа), но неприменимо для электронных блоков объекта по целому ряду причин (таких, как сравнительно быстрое старение электронной элементной базы, сложности выявления предотказного состояния и т. д.).

Цель данной статьи заключается в проведении аналитического обзора су-

ществующих методов оценки технического состояния (ТС) объекта, по результатам которого предлагается новая методика оценки остаточного ресурса критичных элементов конструкции и вертолѐта в целом.

Материалы и методы

В общем случае решение о продлении срока службы объекта принимается на основании результатов математического моделирования либо экспертной оценки. Достоинством метода математического моделирования является отсутствие так называемого «человеческого фактора», недостатком – несовершенство используемых математических моделей, позволяющих определить вероятность отказа изделия при воздействии конкретного фактора, однако зачастую не способных учесть совместный вклад группы внешних факторов, их взаимной корреляции и т. д. Метод экспертных оценок основан на интуитивно-логическом анализе проблемы и, в свою очередь, может привлекать различные методики расчёта остаточного ресурса. Среди них – оценка остаточного ресурса по циклам нагружения, изменению технологических параметров, приведенным напряжениям и эквивалентному давлению, диагностирование остаточного ресурса по развитию коррозионных повреждений [2; 3; 4; 5]. Наряду с перечисленным, в последнее время приобретает популярность оценка остаточного ресурса приборными методами, подразумевающая фиксацию в цифровой форме исто-

рии нагружения данного элемента конструкции с определением плотности появления необратимых структурных изменений, приводящих к изменению рабочих параметров образца.

Реализовать перечисленные методы оценки текущего состояния узлов и несущих конструкций авиационной техники на практике пробовалось неоднократно [6]. Так, известны испытания материалов различных сортов на усталостную напряженность [6; 7; 8; 9]. Т. С. Бойко по результатам обзора парка гражданской пассажирской авиации Украины предлагает формировать последующие профили полёта так, чтобы сбалансированно распределить нагрузку между двигателями и таким образом снизить необходимое число ремонтов [10]. Ю. М. Фейгенбаум указывает на необходимость системного подхода при анализе силовых конструкций гражданских воздушных судов, отмечая, что существующие системы мониторинга нагрузок находятся на стадиях разработки или испытаний [11]. А. В. Котелкин, И. Г. Роберов, Д. Б. Матвеев и И. С. Леднев рассматривают процесс появления и развития усталостных трещин с физической точки зрения, проводя экспериментальные исследования с образцами лонжеронов трёх лопастей МИ-8 из сплава АВТ-1 [12]. По результатам исследований авторы делают вывод о возможности оценки технического состояния и остаточного ресурса деталей на основании остаточных напряжений на поверхности детали, данные о которых получают методом неразрушающей рентгеновской дифрактометрии. Однако данный метод

сопряжен с большими временными издержками, а потому не слишком удобен в эксплуатации, как и дефектоскопия методом вихревых токов.

Результаты и их обсуждение

Таким образом, становится актуальной задача учёта технического состояния силовых конструкций летательных аппаратов (ЛА) и последующего определения остаточного ресурса изделия на основании сведений о напряженно-деформированном состоянии материала силовых конструкций при сокращении времени, необходимого для проверки конкретного ЛА, повышении степени технологичности при сборе информации, возможности распространения результатов и динамики износа на ЛА данного типа.

Удовлетворить требованиям возможно с применением системного анализа ТС критичных узлов ЛА.

Очевидно, что на фактическое состояние фюзеляжа и несущих конструкций существенно влияют особенности эксплуатации объекта, характер нагрузки (т. е. профиль полёта). Профиль полёта – это траектория полёта ЛА в координатах дальность-высота с учётом перегрузок, скорости, режима работы двигателей и т. п. В настоящее время определён перечень всех возможных профилей полёта, однако в общем случае в них присутствуют взлёт и набор высоты, горизонтальный полёт, снижение и посадка, зависание (для вертолётов), отстрел боекомплекта (для объектов военной техники). Определив перечень критичных (уязвимых) элементов конструкции (ЭК)

фюзеляжа, рассчитаем значения коэффициентов нагрузки K_H во всех рассматриваемых профилях полёта. В рамках предположения, что при воздействии допустимого напряжения $\sigma_{\text{доп}}$ возникающая деформация носит исключительно упругий характер, допустим, что в некотором профиле полёта на ЭК действует механическое напряжение σ , тогда коэффициент нагрузки можно рассчитать по формуле

$$K_H = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{доп}}} . \quad (1)$$

Затем значения K_H подтверждаются результатами испытаний и, при необходимости, корректируются, для чего изготавливаются физические модели критических ЭК и подвергаются внешним физическим воздействиям, имитирующим рассматриваемые профили полёта. Значения K_H используются при заполнении таблицы для ЭК №1÷М. В колонке «Т, %» указывается процент времени налёта в данном профиле полёта от общего налёта объекта, причём это значение будет общим для всех элементов конструкции.

Таблица. Таблица нагрузок на критичные ЭК при упругой деформации

Table. Table of loads on critical EC under elastic deformation

Критичные элементы конструкции	Профиль полёта									
	ПП № 1		ПП № 2		ПП № 3		...		ПП № N	
	K_H	Т, %	K_H	Т, %	K_H	Т, %	K_H	Т, %	K_H	Т, %
ЭК №1	K_{H_11}	Т1	K_{H_21}	Т2	K_{H_31}	Т3	...	...	K_{H_n1}	Тn
ЭК №2	K_{H_12}		K_{H_22}		K_{H_32}		...		K_{H_n2}	
ЭК №3	K_{H_13}		K_{H_23}		K_{H_33}		...		K_{H_n3}	
ЭК №4	K_{H_14}		K_{H_24}		K_{H_34}		...		K_{H_n4}	
ЭК № ...	...		...		...		...		...	
ЭК № М	K_{H_1M}		K_{H_2M}		K_{H_3M}		...		K_{H_nM}	

Данные таблицы используются для вычисления среднего коэффициента нагрузки K_{CP} на критичные ЭК для данного профиля полёта (2)...(4) и общего коэффициента нагрузки $K_{H_ОБЩ}$ ЛА за рассматриваемый временной промежуток (5):

$$K_{CP_1} = \sum_1^M K_{H_1M} , \quad (2)$$

$$K_{CP_2} = \sum_1^M K_{H_2M} , \quad (3)$$

$$K_{CP_N} = \sum_1^M K_{H_nM} . \quad (4)$$

Суммируя независимые значения средних потерь прочностного ресурса объекта для предусмотренных ПП с учётом времени отработки объектом данных ПП, имеем

$$K_{H_ОБЩ} = K_{CP_1} \cdot T1 + K_{CP_2} \cdot T2 + \dots + K_{CP_N} \cdot Tn. \quad (5)$$

Выделяя значения K_H , которые превышают соответствующее усреднённое

значение по данному профилю, можно легко определить наиболее уязвимые ЭК и подвергнуть их более тщательному осмотру и, возможно, замене при проведении промежуточного ремонта.

На третьем этапе результаты теоретических расчётов и лабораторных испытаний на прочность подтверждаются испытаниями на объекте. Для этого на критические ЭК устанавливаются датчики нагруженно-деформированного состояния (датчики НДС), по показаниям которых, во-первых, подтверждаются и при необходимости корректируются вновь значения K_H , а во-вторых, выявляется полный эквивалентный ресурс объекта P_Σ , т. е. ресурс до списания.

На данном этапе необходимо сделать ряд замечаний:

1. Игнорирование этапа теоретических расчётов на прочность для выявления критичных ЭК приведёт к неоправданно большому числу устанавливаемых датчиков НДС, что приведёт к неприемлемой конечной стоимости системы мониторинга, значительно усложнит учёт состояний ЭК, приведёт к серьёзному снижению надёжности системы мониторинга при пренебрежительно малом повышении достоверности общего результата и перегрузит объект.

По результатам оценок АО «НЦВ Миль и Камов» даже для контроля состояния 50–100 ЭК, определённых как наиболее уязвимые, потребуется около 800–1000 датчиков НДС, объединённых в общую систему мониторинга.

2. Эквивалентный ресурс изделия и нормы его расхода для разных ПП определяются строго для конкретного объекта и не могут быть распространены на изделия авиационной промышленности других типов.

3. В качестве датчиков НДС могут использоваться устройства различного физического принципа действия. Наиболее удобным представляется применение датчиков ВОДД-1.XXX – оптоволоконных (ОВ) датчиков давления ПИКВ.401143.003 ТУ. Данные датчики обеспечивают диапазон измерения $-3000...+3000$ мкм/м при относительной погрешности измерения деформации $\pm 3\%$ при осуществлении измерений в диапазоне рабочих температур датчика с учётом термокомпенсации¹. ОВ-датчики давления нечувствительны к внешним воздействиям электромагнитного характера в отличие от электрических аналогов, другим достоинством ОВ-датчиков давления является стоимость монтажа, которая значительно ниже и менее трудозатратна, чем монтаж сети электрических датчиков.

Принцип действия ОВ-датчика давления заключается в детектировании и конвертации смещения отраженной волны относительно падающей в значение возникающего напряжения в исследуемой области материала при приложении к нему внешнего воздействия [13]. Часто при этом чувствительным элементом датчиков такого типа является брэгговская решётка, которая, деформируясь

¹ Волоконно-оптический датчик давления ВОДД ПИКВ.401143.003 ТУ. 44 с.

вслед за исследуемым участком ЭК, меняет параметры падающего на неё светового луча¹ [14; 15].

Показания ОВ-датчиков давления позволят определить расход эквивалентного ресурса объекта при внешней нагрузке, приводящей к появлению упругой деформации, пластичной деформации, разрушению элемента конструкции. Также следует учесть, что существует некое значение предела выносливости σ_{-1} , при котором не происходит прироста усталостной напряженности материала, основной вклад в износ образца привносит только фактор старения материала. Общий вид кривой усталостной напряженности при симметричном цикле (т. е. когда максимальное и минимальное нагружение равны по модулю и противоположны по знаку) представлен на рисунке 1.

Также в качестве чувствительного элемента системы мониторинга ТС могут применяться тензодатчики [3] или

емкостные датчики деформации [16]. Недостатком первых является высокая зависимость показаний от температуры среды [17], вторых – нелинейность зависимости емкости от приложенного давления [18]. При этом следует отметить достоинства емкостных датчиков деформации: простота конструкции, точность измерения, временная стабильность [19; 20].

Описанный подход к расчёту остаточного ресурса поясняется рисунком 2. По оси абсцисс откладывается абсолютное значение остаточного эквивалентного ресурса, по оси ординат – временные отсчёты. Кривая расхода ресурса начинается с ввода в эксплуатацию, а заканчивается списанием объекта по техническому состоянию. Участки P1, P2 и P_i показывают расход эквивалентного ресурса при некоторых (1, 2...i и т. д.) профилях полёта, уровень нагруженности ЭК при котором определяется углом наклона соответствующего отрезка.

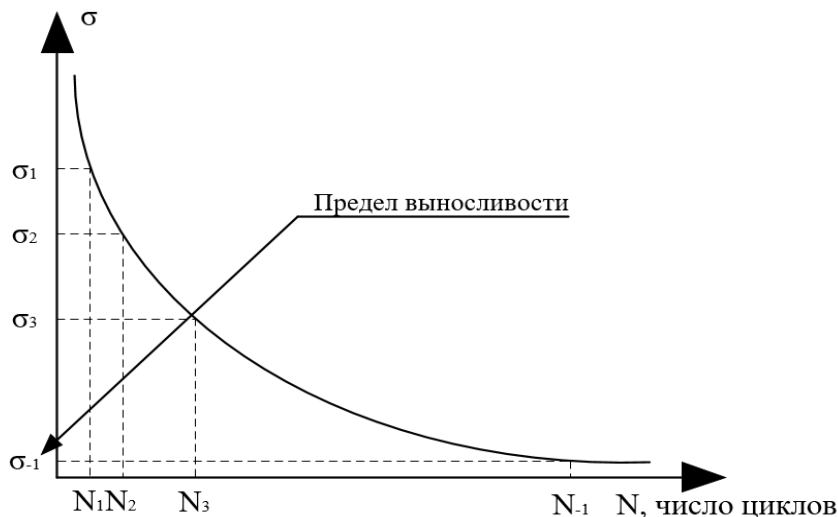


Рис. 1. Кривая усталости при симметричном цикле

Fig. 1. Fatigue curve in a symmetrical cycle

¹ Вахитова Д. В. Разработка волоконно-оптического датчика давления: выпускная квалификационная работа ЮУрГУ–12.03.01;

Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, 2019. 60 с.

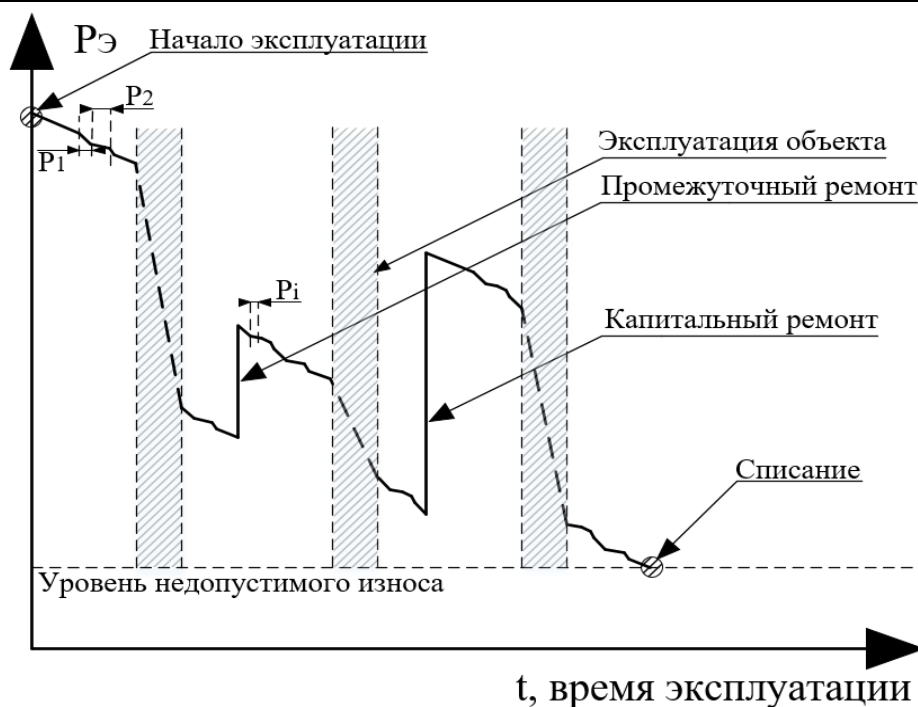


Рис. 2. Диаграмма расхода эквивалентного ресурса при различных профилях полёта

Fig. 2. Diagram of the consumption of an equivalent resource for different flight profiles

Выводы

В статье изложены основные принципы альтернативного подхода к оценке текущего ТС критичных узлов вертолёта на основании сведений о степени их деформированности. Зная значение эквивалентного ресурса объекта, нормы его расхода при различных ПП, а также предельные значения деформации для дан-

ного материала, после преодоления которого наступает состояние пластичной деформации и разрушения, можно осуществить прогнозирование остаточного ресурса изделия, выделить и заменить на этапе промежуточного ремонта наиболее уязвимые ЭК, комплектовать парк авиационной техники исходя из технического состояния и истории эксплуатации конкретного объекта.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. Введ. 2017-01-03. М.: Стандартинформ, 2016. 29 с.
2. Расчёт остаточного ресурса технических устройств (оборудования). URL: https://www.ruspromexpert.ru/uslugi/raschet_ostatochnogo_resursa_tu/ (дата обращения: 10.12.2022).
3. Дубровин В. И., Клименко В. А. Методы оценки остаточного ресурса изделий. Обзор // Математичні машини і системи. 2010. № 4. С. 162–168.
4. Chen H. M., Vidakovic B., Mavris N. D. Multiscale forecasting method using armax models // Technological Forecasting and Social Changes. 2004. N 1. P. 34–39.

5. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.
6. Усталостные испытания материалов и конструкций с использованием современного оборудования / А. В. Ерпалов, Л. А. Шефер, Е. Е. Рихтер, П. А. Тараненко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15, № 2. С. 70–80.
7. Белодеденко С. В. Прогнозирование повреждения и живучести элементов конструкций с использованием моделей накопления повреждений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76, № 1. С. 49–52.
8. Агамиров Л. В., Агамиров В. Л., Вестяк В. А. Алгоритм оценки параметров функции распределения предела выносливости при усталостных испытаниях // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20, № 5. С. 105–110.
9. Нассиф Н. С., Ибатуллин Н. Д. Кинетика усталостного разрушения твердых сплавов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. № 3. С. 87–93.
10. Бойко Т. С. Формирование типовых профилей полетов самолёта транспортной категории с учётом истории эксплуатации парка // Авиационно-космическая техника и технология. 2018. № 6 (150). С. 67–74.
11. Фейгенбаум Ю. М., Соколов Ю. С. Анализ современного состояния и перспектив развития отечественной системы мониторинга эксплуатации силовой конструкции гражданских ВС // Научный вестник Государственного научно-исследовательского института гражданской авиации. 2015. № 7 (318). С. 14–23.
12. Определение остаточного ресурса и методы повышения уровня безопасности при эксплуатации конструкционных материалов в авиации / А. В. Котелкин, И. Г. Роберов, Д. Б. Матвеев, И. С. Леднев // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 1 (4). С. 104–113.
13. Бростилова Т. Ю., Бростилов С. А., Мурашкина Т. И. Волоконно-оптический датчик деформации // Надёжность и качество сложных систем. 2013. № 1. С. 93–99.
14. Fiber Optic Fiber Bragg Grating Sensing for Monitoring and Testing of Electric Machinery: Current State of the Art and Outlook / A. A. Suryandi, N. Sarma, A. Mohammed, V. Peesapati, S. Djurovic // Machines. 2022. N 10. P. 257–279.
15. Бадеева Е. А. Научная концепция проектирования волоконно-оптических датчиков давления с открытым каналом для ракетно-космической и авиационной техники // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2016. № 4 (40). С. 102–113.
16. Овчинников И. Н., Ермишкин В. А. Достоверность результатов испытаний на вибрацию. Диагностика и прогнозирование усталостного разрушения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С. П. Королёва. 2012. № 3 (34). С. 377–384.

17. Что такое тензодатчик. URL: [https:// odinelectric.ru/kipia/chto-takoe-tenzodatchik](https://odinelectric.ru/kipia/chto-takoe-tenzodatchik) (дата обращения: 27.12.2022).

18. Как работает емкостной датчик. URL: <https://teplobloknn.ru/avtomatizaciya/kak-rabotayut-emkostnye-datchiki.html> (дата обращения: 27.12.2022).

19. Повышение точности емкостных датчиков давления для авиакосмической техники / С. А. Кузин, П. А. Львов, А. А. Львов, М. С. Светлов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2017. № 8. С. 29–42.

20. Preethichandra D. M., Shida K. A. Simple Interface Circuit to Measure Very Small Capacitance Changes in Capacitive Sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2001. N 50 (6). P. 1583–1586.

References

1. GOST 27.002-2015. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya [State Standard 27.002-2015. Reliability in technology. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 29 p.

2. Raschet ostatochnogo resursa tekhnicheskikh ustroystv (oborudovaniya) [Calculation of the residual resource of technical devices (equipment)]. Available at: <https://www.rus-promexpert.ru/uslugi/raschet-residual-resursa-tu/>. (accessed 27.02.2023)

3. Dubrovin V. I., Klimenko V. A. Metody otsenki ostatochnogo resursa izdelii. Obzor [Methods of estimating the residual resource of the products. Review]. *Matematichni mashini i sistemi = Mathematical Machines and Systems*, 2010, no. 4, pp. 162–168.

4. Chen H. M., Vidakovich B., Mavris N. D. Multiscale forecasting method using ar-max models. *Technological Forecasting and Social Changes*, 2004, no. 1, pp. 34–39.

5. Bolotin V. V. Prognozirovanie resursa mashin i konstruktsii [Forecasting the resource of machines and structures]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1984. 312 p.

6. Erpalov A. V., Schaefer L. A., Richter E. E., Taranenko P. A. Ustalostnye ispytaniya materialov i konstruktsii s ispol'zovaniem sovremennogo oborudovaniya [Fatigue tests of materials and structures using modern equipment]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 70–80.

7. Belodedenko S. V. Prognozirovanie povrezhdeniya i zhivuchesti elementov konstruktsii s ispol'zovaniem modelei nakopleniya povrezhdenii [Forecasting damage and survivability of structural elements using damage accumulation models]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika Materialov = Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2010, vol. 76, no. 1, pp. 49–52.

8. Agamirov L. V., Agamirov V. L., Vestyak V. A. Algoritm otsenki parametrov funktsii raspredeleniya predela vynoslivosti pri ustalostnykh ispytaniyakh [Algorithm for estimating the parameters of the distribution function of the endurance limit during fatigue tests]. *Vestnik*

Moskovskogo aviatsionnogo instituta = Bulletin of the Moscow Aviation Institute, 2013, vol. 20, no. 5, pp. 105–110.

9. Nassif N. S., Ibatullin N. D. Kinetika ustalostnogo razrusheniya tverdykh splavov [Kinetics of fatigue failure of hard alloys]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2012, no. 3, pp. 87–93.

10. Boyko T. S. Formirovanie tipovykh profilei poletov samoleta transportnoi kategorii s uchetom istorii ekspluatatsii parka [Formation of typical flight profiles of a transport category aircraft taking into account the history of fleet operation]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya = Aviation and Space Technology and Technology*, 2018, no. 6 (150), pp. 67–74.

11. Feigenbaum Yu. M., Sokolov Yu. S. Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektiv razvitiya otechestvennoi sistemy monitoringa ekspluatatsii silovoi konstruksii grazhdanskikh VS [Analysis of the current state and prospects of development of the domestic system for monitoring the operation of the power structure of civil aircraft]. *Nauchnyi vestnik gosudarstvennogo nauchno-issledovatel'skogo instituta grazhdanskoi aviatsii = Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation*, 2015, no. 7 (318), pp. 14–23.

12. Kotelkin A. V., Roberov I. G., Matveev D. B., Lednev I. S. Opredelenie ostatocnogo resursa i metody povysheniya urovnya bezopasnosti pri ekspluatirovanii konstruksionnykh materialov v aviatsii [Determination of the residual resource and methods of increasing the level of safety in the operation of structural materials in aviation]. *Sovremennye Materialy, Tekhnika i Tekhnologii = Modern Materials, Equipment and Technologies*, 2016, no. 1 (4), pp. 104–113.

13. Brostilova T. Yu., Brostilor S. A., Murashkina T. I. Volokonno-opticheskii datchik deformatsii [Fiber-optic strain sensor]. *Nadezhnost' i Kachestvo Slozhnykh Sistem = Reliability and Quality of Complex Systems*, 2013, no. 1, pp. 93–99.

14. Suryandi A. A., Sarma N., Mohammed A., Pisapati V., Djurovich S. Fiber-optic sensor of the Bragg grid for monitoring and testing of electric machines: current state and prospects. *Machines*, 2022, no. 10, pp. 257–279.

15. Badeeva E. A. Nauchnaya kontseptsiya proektirovaniya volokonno-opticheskikh datchikov davleniya s otkrytym kanalom dlya raketno-kosmicheskoi i aviatsionnoi tekhniki [Scientific concept of designing fiber-optic pressure sensors with an open channel for rocket, space and aviation technology]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Povolozhskii Region = Proceedings of Higher Education Institutions. Povolozhsky Region*, 2016, no. 4 (40), pp. 102–113.

16. Ovchinnikov I. N., Ermishkin V. A. Dostovernost' rezul'tatov ispytaniy na vibratsiyu. Diagnostika i prognozirovaniye ustalostnogo razrusheniya [Reliability of vibration test results. Diagnostics and prediction of fatigue failure]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aéro-kosmicheskogo universiteta im. S. P. Koroleva = Bulletin of Samara State Aerospace University named after S. P. Korolev*, 2012, no. 3 (34), pp. 377–384.

17. Chto takoe tenzodatchik [What is a load cell]. Available at: [https:// odinelectric.ru/kipia/chto-takoe-tenzodatchik](https://odinelectric.ru/kipia/chto-takoe-tenzodatchik). (accessed 27.12.2022)

18. Kak rabotaet emkostnoi datchik [How the capacitive sensor works]. Available at: <https://teplobloknn.ru/avtomatizaciya/kak-rabotayut-emkostnye-datchiki.html>. (accessed 27.12.2022)

19. Kuzin S. A., Lviv P. A., Lviv A. A., Svetlov M. S. Povyshenie tochnosti emkostnykh datchikov davleniya dlya aviakosmicheskoi tekhniki [Improving the accuracy of capacitive pressure sensors for aerospace equipment]. *Izvestiya Yuzhnogo Federal'nogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki = Proceedings of Southern Federal University. Technical Sciences*, 2017, no. 8, pp. 29–42.

20. Pritichandra D. M., Shida K. A. Simple Interface Circuit to Measure Very Small Capacitance Changes in Capacitive Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, no. 50 (6), pp. 1583–1586.

Информация об авторах / Information about the Authors

Сизонов Иван Игоревич, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

Ivan I. Sizonov, Student of the Department of Space Instrumentation and Communications, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

Барабушка Александр Сергеевич, заместитель генерального конструктора, АО НЦВ «Миль и Камов», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: bas2701@yandex.ru

Alexander S. Barabushka, Deputy General Designer, JSC NCH "Mil' i Kamov", Moscow, Russian Federation, e-mail: bas2701@yandex.ru

Мухин Иван Ефимович, доктор технических наук, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: MukhinI@aviaavtomatika.ru

Ivan E. Mukhin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Space Instrumentation and Communications, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: MukhinI@aviaavtomatika.ru