

АНОТАЦІЯ

Гаєвський С.В. Математичні моделі та методи продовження залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 «Транспортні технології». – Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, 2021.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу, яка полягає в обґрунтуванні та розробці моделей та методів розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи (РЕС) літака, що зменшить поточні витрати на обслуговування літака при одночасному забезпеченні безвідмовної та безпечної експлуатації повітряного судна.

У роботі були розглянуті суперечності в практиці застосування існуючого методичного апарату для продовження ресурсу радіоелектронної системи літака. В результаті розгляду були вказані основні фактори, які впливають на необхідність вдосконалення процесів розрахунку залишкового ресурсу РЕС літака, серед яких широке застосування апаратури, виготовленої з використанням мікроелектронних компонентів, впровадження сучасних цифрових технологій з високим ступенем інтеграції тощо. Вони роблять проблематичним застосування існуючого науково-методичного апарату через продукування грубих і завищених прогнозів показників безвідмовності РЕС літака.

У ході аналізу науково-методичного апарату, що застосовується для побудови моделей розрахунку залишкового ресурсу РЕС літака, були виявлені недоліки існуючої методики, до яких можна віднести неповне врахування впровадження в радіоелектронну апаратуру сучасної елементної бази. Широке застосування комплектуючих елементів в мікроелектронному виконанні призводить до кардинальних змін потоків відмов в радіоелектронних системах. Застосування відомих параметричних та імовірнісних методів

оцінки надійності та безвідмовності роботи не дає змоги отримати адекватні результати.

Даний факт тягне за собою необхідність вдосконалення існуючого науково-методичного апарату, що застосовується для розрахунку показників довговічності та можливості продовження призначених термінів служби радіоелектронної системи літака.

Проведений аналіз і виявлені недоліки відомого науково-методичного апарату дозволив сформулювати загальну наукову задачу дисертаційного дослідження як обґрунтування та розробку моделей та методів розрахунку показників залишкового ресурсу РЕС літака, які зменшать поточні витрати на обслуговування літака при одночасному забезпеченні безвідмовної та безпечної експлуатації повітряного судна.

Проведений аналіз РЕС літака як об'єкта експлуатації і визначення залишкового ресурсу, робіт з продовження ресурсів літаків, методів і методик розрахунку їх показників довговічності свідчить про необхідність і можливість удосконалення науково-методичного апарату вирішення завдань продовження ресурсів льотної техніки і, зокрема, РЕС літака. Відомі методики розрахунку показників довговічності не дозволяють коректно проводити розрахунки показників залишкового ресурсу РЕС літака, що виробили призначений термін служби з урахуванням їх фактичного стану і рівня надійності, що зумовлено прийнятими припущеннями методів розрахунку і спрощеннями об'єкта експлуатації.

Розроблено загальні положення з розрахунку показників залишкового ресурсу РЕС літака, що становлять методичну основу методики розрахунку і включають ієрархічну схему розрахунку, процедуру розбиття функціональних систем, функціональних вузлів і комплектуючих виробів на невідновлювані та відновлювані об'єкти з повними, мінімальними або неповними відновленнями; процедуру розробки нових або використання відомих математичних моделей процесів відмов і відновлень для відповідних

об'єктів; загальні положення щодо оцінки технічного стану та обґрунтування ознак граничних станів РЕС літака, інші загальні положення.

Показано, що оцінку граничних станів РЕС літака доцільно здійснювати за сукупністю показників, що відображають стан комплектуючих виробів, функціональних вузлів і систем, складових частин РЕС, кабельних виробів, матеріалів, допоміжних пристроїв і їх показників надійності. Отримано узагальнення відомих математичних моделей потоку відмов комплектуючих виробів при необмеженій кількості мінімальних відновлень кінцевої тривалості.

Розглянуто математичні моделі потоку відмов комплектуючих виробів схемної позиції з кінцевим числом відновлень різної глибини протягом призначеного строку служби, показана доцільність їх використання при розрахунках показників залишкового ресурсу.

Введено поняття залишковий ресурс і залишкове напрацювання для відновлюваних виробів, відповідні показники залишкового ресурсу і залишкового напрацювання.

Розглянуто математичні моделі для розрахунку показників залишкового ресурсу і залишкового напрацювання відновлюваного виробу з одним ресурсним елементом при кінцевому числі повних або мінімальних відновлень комплектуючих елементів. Отримано узагальнення цих моделей для відновлюваного виробу з кількома ресурсними елементами.

Отримано розрахункові відносини для показників залишкового ресурсу і залишкового напрацювання функціональних вузлів і систем при кінцевому числі мінімальних відновлень ресурсних елементів.

Запропоновано методику розрахунку показників надійності відновлюваного функціонального вузла і системи РЕС літака на подовженому інтервалі експлуатації, що враховує відновлення ресурсу (в повному, неповному або нульовому обсязі) при поточному ремонті тільки у замінного або відновлюваного комплектуючого елемента та незмінність ресурсу інших елементів вузла або системи.

Розглянуто особливості розрахунку показників залишкового напрацювання РЕС літака, його функціональних систем. Запропоновано дві схеми наближеного розрахунку з використанням структурних схем надійності; із застосуванням методу фазового укрупнення станів. Розроблено відповідні математичні моделі та досліджено залежності відносної похибки розрахунків величини нестационарного коефіцієнта від числа функціональних систем, рівня їх надійності, напрацювання.

Показано, що точність розрахунків показників залишкового ресурсу визначається точністю оцінки моменту початку старіння РЕС літака, точністю оцінки лінії регресії для параметра потоку відмов, точністю завдання показників вартісних витрат на експлуатацію РЕС літака і інших показників. Отримано розрахункові співвідношення для оцінки похибок розрахунку показників довговічності. Запропоновано розрахункові співвідношення по оцінці вартісних витрат на експлуатацію РЕС літака, що забезпечують розрахунки економічно вигідних строків служби і прийняття рішень на продовження експлуатації, ремонт або списання літака.

Застосування запропонованої методики розрахунку показників залишкового ресурсу ефективно для РЕС літака в цілому і його функціональних систем, за даними експлуатації яких можливе накопичення необхідного обсягу статистичної інформації для побудови регресійних залежностей параметра потоку відмов і інтенсивності відновлень в часі з прийнятною для вирішення завдань продовження ресурсів точністю і достовірністю.

Розроблений методичний апарат дозволяє вирішувати ряд актуальних завдань продовження ресурсу РЕС літака, наприклад: формувати сукупність ознак граничних станів РЕС літака для оцінки їх стану на місцях експлуатації; здійснювати розрахунки показників залишкового ресурсу РЕС літака для прийняття рішень на продовження ресурсів, на проведення випробувань лідерних літаків за оцінкою показників залишкового ресурсу, для обґрунтування обсягів випробувань; обґрунтовувати необхідність

проведення додаткових випробувань окремих функціональних систем, вузлів, обсяги випробувань та ін.

Крім того, розроблені загальні положення з розрахунку залишкового ресурсу РЕС літака і основні положення методики розрахунку показників залишкового ресурсу РЕС з урахуванням досягнутого напрацювання (терміну служби) і фактичного стану можуть служити основою для подальшої розробки та вдосконалення науково-методичного апарату вирішення завдань продовження ресурсів (термінів служби) інших виробів.

Отримані нові результати в поєднанні з використаними в роботі відомими методами є рішенням науково-технічної задачі з розробки моделей та методів розрахунку показників залишкового ресурсу РЕС літака, які зменшать поточні витрати на обслуговування літака при одночасному забезпеченні безвідмовної та безпечної експлуатації повітряного судна.

Ключові слова: безвідмовність, безпечна експлуатація, граничний стан, довговічність, залишковий ресурс, науково-методичний апарат, продовження терміну служби, радіоелектронна система, технічний стан.

ANNOTATION

Haievskyi S. Mathematical models and methods for extending the residual life of the aircraft radioelectronic system. – Manuscript.

A thesis for Doctor of Philosophy degree in specialty 275 «Transport Technologies». – Flight Academy of National Aviation University, Kropyvnytskyi, 2021.

The dissertation solves an urgent scientific problem, which was to substantiate and develop models and methods for calculating the final resource of the radioelectronic system (RES) of the aircraft, which will reduce the current cost of aircraft maintenance while ensuring failure-free and safe operation of the aircraft.

The paper considers the contradictions in the practice of using the existing methodological apparatus to extend the life of the RES of the aircraft. The review

identified the main factors influencing the need to improve the calculation of the residual resource of the aircraft, including the widespread use of equipment made using microelectronic components, the introduction of modern digital technologies with a high degree of integration. They make it problematic to use existing scientific and methodological apparatus due to the production of rough and inflated forecasts of reliability of the RES of the aircraft.

During the analysis of the scientific and methodological apparatus used to build models for calculating the residual resource of the aircraft, the shortcomings of the existing methodology were identified, which include incomplete consideration of the introduction of modern electronic base in electronic equipment. Widespread use of components in microelectronic design leads to radical changes in failure rates in radioelectronic systems. The use of known parametric and probabilistic methods for assessing the reliability and failure-free of work does not allow to obtain adequate results.

This fact entails the need to improve the existing scientific and methodological apparatus used to calculate the durability and the possibility of extending the service life of the radioelectronic system of the aircraft.

The analysis and identified shortcomings of the known scientific and methodological apparatus allowed to formulate the general scientific task of the dissertation research as a substantiation and development of models and methods for calculating the final resource of the radioelectronic system of the aircraft, which will reduce current maintenance costs while ensuring failure-free and safe aircraft operation.

The analysis of aircraft RES as an object of operation and determination of residual life, the works of extending the resources of aircraft, methods and techniques for calculating their durability indicates the need and ability to improve the scientific and methodological apparatus to solve problems of extending the resources of aircraft and, in particular, aircraft RES. Known methods of calculating durability do not allow to correctly calculate the residual life of the aircraft, which have developed the intended service life, taking into account their actual condition

and level of reliability, due to the accepted assumptions of calculation methods and simplifications of the facility.

The general provisions on calculation of indicators of residual resource of the aircraft RES which make a methodical basis of a calculation technique and include the hierarchical scheme of calculation, procedure of division of functional systems, functional knots and structural products into non-renewable and renewable objects with full, minimum or incomplete restorations are developed; the procedure for developing new or using known mathematical models of failure and recovery processes for relevant objects; general provisions on the assessment of the technical condition and substantiation of the signs of the limit states of the aircraft RES, other general provisions, are developed.

It is shown that the assessment of the limit states of the aircraft RES should be carried out on a set of indicators that reflect the state of components, functional units and systems, components of the RES, cable products, materials, accessories and their reliability. A generalization of the known mathematical models of the failure rate of components with an unlimited number of minimal restorations of finite duration is obtained.

Mathematical models of the flow of failures of the structural products of the circuit position with a finite number of restorations of different depth during the assigned service life are considered; the expediency of their use in the calculation of residual life is shown.

The concept of residual life and residual operating time for renewable products and the corresponding indicators of residual life and residual operating time are introduced.

Mathematical models for calculation of indicators of residual resource and residual operating time of the restored product with one resource element at finite number of full or minimum restorations of accessories are considered. Generalizations of these models for a renewable product with several resource elements are obtained.

The calculated relations for the indicators of residual resource and residual operating time of functional units and systems at a finite number of minimal renewals of resource elements are obtained.

The technique of calculation of indicators of reliability of the restored functional unit and system of the aircraft RES on the extended interval of operation taking into account resource restoration (in full, incomplete or zero volume) at current repair only at a replaceable or renewable component and invariance of a resource of other elements of knot or system is offered.

Features of calculation of indicators of residual operating time of the aircraft RES, its functional systems are considered. Two schemes of approximate calculation using structural schemes of reliability; using the method of phase aggregation of states are offered. Appropriate mathematical models are developed and the dependences of the relative error of calculations of the value of the nonstationary coefficient on the number of functional systems, the level of their reliability, operating time are investigated.

It is shown that the accuracy of calculations of residual life indicators is determined by the accuracy of estimating the moment of aging of the aircraft RES, the accuracy of regression line estimation for the failure rate parameter, the accuracy of cost indicators for operating the aircraft RES and other indicators. The calculated ratios for estimating the errors in the calculation of durability indicators are obtained. The calculated ratios for estimating the cost of operation of the aircraft RES, which provide calculations of cost-effective service life and decision-making to continue operation, repair or decommissioning of the aircraft, are suggested.

The application of the proposed technique of calculating of the indicators of residual life is effective for the aircraft RES as a whole and its functional systems, according to which operation may accumulate the necessary amount of statistical information to build regression dependences of failure rate and recovery intensity over time with acceptable accuracy and reliability.

The developed methodical apparatus allows to solve a number of actual tasks of prolongation of a resource of the aircraft RES, for example: to form set of signs of

limit states of the aircraft RES for an estimation of their condition on places of operation; to carry out calculations of indicators of residual resource of the aircraft RES for decision-making on extension of resources, on carrying out of tests of leading aircraft on an estimation of indicators of residual resource, for a substantiation of volumes of tests; substantiate the need for additional tests of individual functional systems, components, test volumes, etc.

In addition, the developed general provisions for calculating the residual resource of the aircraft and the main provisions of the methodology for calculating the residual resource of the RES, taking into account the achieved time (service life) and the actual state can serve as a basis for further development and improvement of scientific and methodological apparatus for solving problems of extending the resources (service life) of other products.

The obtained new results in combination with the known methods used in the work are the solution of the scientific and technical problem of developing models and methods for calculating the final resource of the radioelectronic system of the aircraft, which will reduce current maintenance costs while ensuring failure-free and safe operation of the aircraft.

Keywords: durability, extension of service life, failure-free, limit state, radioelectronic system, residual life, safe operation, scientific and methodical apparatus, technical condition.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати

1. Гаєвський С. Аналіз радіоелектронної системи літака як об'єкта продовження терміну експлуатації / С. Гаєвський, С. Балакірева, Д. Комаров, В. Явтушенко. *Системи управління, навігації та зв'язку* : збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2020. Т. 1 (59). С. 15–20.
doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.015>.

2. Гаєвський С. Розробка загальних положень з розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака / С. Гаєвський, С. Балакірева, І. Кулаков. *Системи управління, навігації та зв'язку* : збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2020. Т. 2 (60). С. 3–11. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.003>.

3. Haievskiy S. Mathematical models of the failure flow of the aircraft electronic system components / S. Haievskiy, S. Khmelevskiy, A. Voiko, T. Mishchenko, O. Timochko. *Advanced Information Systems*. 4 (2). P. 34–41. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.07>.

4. Гаєвський С. Математичні моделі для розрахунку показників залишкового ресурсу невідновлювальних комплектуючих виробів радіоелектронної системи літака / С. Гаєвський, С. Балакірева, І. Кулаков. *Системи управління, навігації та зв'язку* : збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2020. Т. 3 (61). С. 49-52. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.049>.

5. Haievskiy S. Mathematical models for calculating the residual life of the recoverable components of the aircraft electronic system / S. Haievskiy, I. Kulakov, O. Shapovalov, O. Timochko, V. Pavlenko. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 3 (13). P. 14–24. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.014>.

6. Гаєвський С.В. Метод розрахунку показників залишкового ресурсу радіоелектронної системи літака / Є.С. Воробйов, Н.В. Гармаш, Є.М. Дроб, Є.А. Толкаченко, С.В. Гаєвський, А.В. Колесник. *Polish Journal of Science*. 2021. № 36-1. С. 35–45. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44703630>.

Опубліковані праці апробаційного характеру

1. Гаєвський С.В. Модель розрахунку показників остаточного ресурсу комплектуючих виробів, функціональних вузлів та систем радіоелектронних систем літака / С.В. Гаєвський, О.В. Якобінчук, І.В. Захарченко, Д.О. Пархоменко. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління* : матеріали дев'ятої міжнар. наук.-техн.

конф. Харківського національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", Харків, 11–12 квітня 2019 р. С. 89.

2 Гаєвський С.В. Математичні моделі потоку відмов комплектуючих виробів літака / С.В. Гаєвський, Ю.В. Данюк, І.В. Захарченко, С.В. Герасімов. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : матеріали п'ятнадцятої міжнар. наук. конф. Харківського національного університету Повітряних Сил, Харків, 10–11 квітня 2019 р. С. 168.

3. Гаєвський С.В. Аналіз радіоелектронної системи літака як об'єкта продовження терміну експлуатації / С.В. Гаєвський, С.М. Балакірева. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : матеріали шістнадцятої міжнар. наук. конф. Харківського національного університету Повітряних Сил, Харків, 15–16 квітня 2020 р. С. 168.