

Определение качественных показателей и критерия оптимальности системы диагностирования неисправностей технических систем

Андрей Ф. Астапенко	¹	hotfix18@yandex.ru
Дмитрий Н. Смирнов	¹	48dimka54@mail.ru
Вадим И. Ткачев	¹	vi-tkachev@mail.ru
Сергей Ю. Панов	¹	su-panov@yandex.ru
Сергей В. Лавров	²	

¹ Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. В представленной статье рассматриваются вопросы совершенствования системы технического обслуживания и ремонта, экономических и других мер, направленных на обеспечение и контроль летной годности в условиях эксплуатации авиационной техники. Для обеспечения безопасной эксплуатации действующего оборудования все с большей остротой встает вопрос о его техническом диагностировании с целью определения остаточного ресурса работы. Прежде чем перейти к прогнозированию остаточного ресурса следует произвести анализ основных причин аварий и отказов технических систем авиационной техники, распределения дефектов по элементам конструкции авиационной техники, экспертизу параметров дефектов с целью оценки потенциальной опасности и установления приоритетности ремонта выявляемых при диагностировании дефектов, на что в свою очередь влияет выбор системы диагностирования. При наличии неопределенности принятия решения применяют специальные методы, учитывающие вероятностную природу событий. Они позволяют назначать границу поля допуска параметра или необходимое число опытов для принятия решения о диагностировании. предложено решение задачи повышения достоверности оценки состояния оборудования на основе критерия оптимальности с использованием метода Байеса. С этой целью определены качественные показатели диагностирования при условии наличия неисправности, являющиеся соответствующими условными вероятностями правильного диагностирования, и аналогично условными вероятностями пропуска неисправности и вероятности ложной тревоги. Каждому ошибочному решению поставим в соответствие некоторую цену – стоимость ошибки. Для безошибочных решений эту стоимость условимся считать равной нулю. Тогда систему диагностирования можно характеризовать средней стоимостью (математическое ожидание стоимости) ошибочных решений. Если сравниваются две системы диагностирования, где первая из них является оптимальной, то в силу предложенного решения оптимальная система диагностирования дает наименьшую вероятность пропуска неисправности среди всех систем диагностирования, у которых условная вероятность ложной тревоги не больше, чем у оптимальной.

Ключевые слова: диагностика, неисправность, критерий оптимальности, средний риск, вероятность

Defining quality indicators and criteria for optimal fault diagnosis system of technical system

Andrei F. Astapenko	¹	hotfix18@yandex.ru
Dmitrii N. Smirnov	¹	48dimka54@mail.ru
Vadim I. Tkachev	¹	vi-tkachev@mail.ru
Sergei Yu. Panov	¹	su-panov@yandex.ru
Sergey V. Lavrov	²	

¹ Military educational and scientific center of the Air Force "The Air Force Academy. Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Starikh Bolshevikov str., 54a, Voronezh, 394064, Russia

² Voronezh state university of engineering technologies, Revolution av., 19, Voronezh, 394036, Russia

Summary. The questions of perfection of the system of technical service and repair, economic and other measures, sent to providing and control of flightworthiness in the conditions of exploitation of aerotechnics are examined in the presented article. To ensure the safe operation of existing equipment, the issue of its technical diagnosis with the purpose of determining the remaining service life is becoming more acute. Before proceeding to the forecasting of the residual resource, an analysis should be made of the main causes of accidents and failures in the technical systems of aviation equipment, the distribution of defects in the elements of the design of aviation equipment, the examination of the parameters of defects in order to assess the potential hazards and prioritize repairs detected in the diagnosis of defects, which in turn The choice of the diagnostic system influences. At presence of vagueness of decision-making apply the special methods, taking into account probabilistic nature of events. They allow to appoint the border of the field of admittance of parameter or necessary number of experiments for a decision-making about diagnosticating. solution of task of increase of authenticity of estimation of the state of equipment is offered on the basis of criterion of optimality with the use of Bayes' method. To that end the high-quality indexes of diagnosticating are certain on condition of presence disrepairs, being corresponding conditional probabilities of the correct diagnosticating, and like by conditional probabilities of admission of disrepair and probability of false alarm. Will put every erroneous decision in accordance some price – cost of error. For faultless decisions this cost will arrange to consider equal to the zero. Then the system of diagnosticating can be characterized by expected value of cost of erroneous decisions. If two systems of diagnosticating are compared, where first from them is optimal, then by virtue of the offered solution the optimal system of diagnosticating gives the least probability of admission of disrepair among all systems of diagnosticating, which conditional probability of false alarm is no more, than at optimal at.

Keywords: diagnostics, fault, optimality criterion, the average risk probability

Для цитирования

Астапенко А.Ф., Смирнов Д.Н., Ткачев В.И., Панов С.Ю., Лавров С.В. Определение качественных показателей и критерия оптимальности системы диагностирования неисправностей технических систем // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 3. С. 82–85. doi:10.20914/2310-1202-2017-3-82-85

For citation

Astapenko A.F., Smirnov D.N., Tkachev V.I., Panov S.Yu., Lavrov S.V. Defining quality indicators and criteria for optimal fault diagnosis system of technical system. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 3. pp. 82–85. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-3-82-85

Для обеспечения безопасной эксплуатации действующего оборудования все с большей остротой встает вопрос о его техническом диагностировании с целью определения остаточного ресурса работы [1, 2].

Одним из важных этапов эксплуатации является своевременное и качественное обслуживание и восстановление авиационной техники (АТ) [3,4]. Для того чтобы своевременно и качественно обслужить и восстановить АТ необходимо определить техническое состояние. Эксплуатационная диагностика (ЭД) занимается решением широкого круга задач, связанных с определением технического состояния (ТС) АТ. Сегодня проблема повышения эффективности ЭД входит в число наиболее актуальных проблем технической эксплуатации (ТЭ) так как на долю работ, связанных с проверкой работоспособности и поиском неисправностей (дефектов), приходится более половины трудоемкости технического обслуживания и ремонта и около 90% времени простоя АТ при устранении неисправностей [5].

Эффективность использования программ профилактического и диагностического обслуживания, определяется следующими аспектами [5]:

- исключением неожиданной потери работоспособности, вызванной отказом оборудования или систем;
- повышенной производительностью;
- снижением затрат на техническое обслуживание.
- продлением срока эксплуатации.

Методология прогнозирования остаточного ресурса интенсивно изучалась и разрабатывалась в свое время академиком В.В. Болотным на основе теории вероятностей и математической статистики [6]. С этой целью им использовались различные модели (кумулятивные, полудетермистические, марковские, Пуассоновские и другие).

Прежде чем перейти к прогнозированию остаточного ресурса следует произвести анализ основных причин аварий и отказов технических систем АТ, распределения дефектов по элементам конструкции АТ, экспертизу параметров дефектов с целью оценки потенциальной опасности и установления приоритетности ремонта выявляемых при диагностировании дефектов, на что в свою очередь влияет выбор системы диагностирования.

При наличии неопределенности принятия решения применяют специальные методы, учитывающие вероятностную природу событий. Они позволяют назначать границу поля допуска параметра или необходимое число опытов для принятия решения о диагностировании.

Так, большинство методов предполагают априорно известные вероятности диагностирования для однотипных объектов, находящихся

в одинаковых условиях. Часто выбор того или иного решающего правила проводится на основе оптимизации по некоторым критериям. Статистические методы позволяют одновременно учитывать диагностические сигналы различной физической природы, так как они работают лишь с их вероятностными характеристиками [7].

Одним из современных статистических методов является байесовский метод, который широко используется в различных экспертных системах [7–10]. Традиционное использование диагностических симптомов для вероятностной диагностики (метод Байеса), пригодно для статистики, определяющей на множестве неисправного оборудования точность диагностирования, но никак не для определения конкретной неисправности у конкретного изделия. Существенным ограничением применимости этого метода в диагностике является тот факт, что расчётные соотношения, используемые в нём, справедливы лишь при независимости каждого из диагностических симптомов из наблюдаемой совокупности [9].

Это обстоятельство делает Байесовский метод неприменимым для решения задач выделения наиболее вероятного дефекта из совокупности других, имеющих смежные совокупности диагностических симптомов. Кроме того, неудовлетворительно проработаны системные обоснования определения априорной вероятности.

Цель работы – предложить альтернативный подход к решению задач технической диагностики поиска неисправностей.

Качественными показателями диагностирования при условии наличия неисправности являются соответствующие условные вероятности правильного диагностирования

$$D = P(A_1^* | A_1) = P(A_1^* A_1) / P(A_1) \quad (1)$$

и пропуска неисправности

$$\hat{D} = P(A_0^* | A_1) = P(A_0^* A_1) / P(A_1) \quad (2)$$

Поскольку соответствующие одному и тому же условию A_1 решения A_1^* и A_0^* являются взаимоисключающими, то $D + \hat{D} = 1$

Качественным показателем обнаружения при отсутствии неисправности являются условная вероятность ложной тревоги

$$F = P(A_1^* | A_0) = P(A_1^* A_0) / P(A_0) \quad (3)$$

и вероятность правильно необнаруженной неисправности

$$\hat{F} = P(A_0^* | A_0) = P(A_0^* A_0) / P(A_0) \quad (4)$$

причем $F + \hat{F} = 1$

В результате диагностирования должно быть выдано решение о наличии или отсутствии неисправности. Решение может быть принято при двух взаимно исключающих условиях [8, 10]:

условие A_1 – «неисправность есть»;
 условие A_0 – «неисправности нет», которое
 при выработке решения неизвестно.

За счет помех и флуктуаций диагностирующего сигнала каждому условию могут соответствовать два вида решения:

решение A^*_1 – «неисправность есть»;

решение A^*_0 – «неисправности нет».

Третьего решения после завершения процесса диагностирования не должно быть.

При диагностировании возможны четыре ситуации:

ситуация $A^*_1A_1$ – «неисправность обнаружена»;

ситуация $A^*_0A_1$ – «пропуск неисправности»;

ситуация $A^*_1A_0$ – «ложная тревога»;

ситуация $A^*_0A_0$ – «правильное необнаружение неисправности».

Перечисленным ситуациям соответствуют четыре вероятности совмещения событий, сумма которых равна единице

$$P(A^*_1A_1) + P(A^*_0A_1) + P(A^*_1A_0) + P(A^*_0A_0) = 1 \quad (5)$$

Каждому ошибочному решению поставим в соответствие некоторую цену – стоимость ошибки $r_{iki} = 0, 1$; $k = 0, 1$. Для безошибочных решений эту стоимость условимся считать равной нулю $r_{11} = r_{00} = 0$. Тогда систему диагностирования можно характеризовать средней стоимостью (математическое ожидание стоимости) ошибочных решений

$$M(r) = \bar{r} = r_{01}P(A^*_0A_1) + r_{10}P(A^*_1A_0) \quad (6)$$

Лучшей из сравниваемых систем диагностирования можно тогда считать систему, удовлетворяющую критерию минимума этой стоимости, иначе критерию риска.

Ввиду того, что задание вероятностей наличия и отсутствия неисправности $P(A_1)$ и $P(A_0)$, называемых априорными (доопытными), вызывает практические трудности, затруднителен и расчет вероятностей совмещения $P(A^*_0A_1)$ и $P(A^*_1A_0)$. Поэтому при проектировании и испытаниях аппаратуры диагностирования переходят к условиям вероятностей, являющихся

ЛИТЕРАТУРА

1 Махитько В.П., Степанов С.М., Степанов Д.С. Методы обеспечения надежности при техническом обслуживании и ремонте воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 122. С. 45–49

2 Далецкий С.В., Чинючин Ю.М., Ойдов Н. Новые принципы формирования режимов периодического технического обслуживания воздушных судов по критериям безопасности полетов // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219 (9). С. 20–26

3 Kiyak E. The Effects of Aircraft Preventive Maintenance on Reliability // International journal of applied mathematics and informatics. 2012. Issue 1, V. 6. pp. 9–16.

качественными показателями диагностирования при условии наличия или отсутствия неисправности.

Используя приведенные соотношения (1)–(4), выражение (6) для средней стоимости ошибки можно представить в виде

$$\bar{r} = r_{01}\hat{D}P(A_1) + r_{10}FP(A_0) \quad (7)$$

или, после замены $\hat{D} = 1 - D$ и простых преобразований

$$\bar{r} = r_{01}P(A_1)[1 - (D - l_0F)] \quad (8)$$

$$\text{где } l_0 = \frac{r_{10}P(A_0)}{r_{01}P(A_1)}$$

При этом критерий оптимальности диагностирования по минимуму среднего риска сводится к так называемому весовому критерию

$$D - l_0F = \max \quad (9)$$

Последний показывает, что совокупность требований повышения условной вероятности правильного обнаружения неисправности D и понижения условной вероятности ложной тревоги F стремится к увеличению взвешенной разности $D - l_0F$. Множитель l_0 , называемый весовым множителем, зависит от соотношения стоимостей ошибок каждого вида и вероятностей наличия или отсутствия неисправности в диагностируемом объекте.

Если при одинаковом весовом множителе l_0 сравниваются две системы диагностирования, где первая из них является оптимальной, то в силу (9) можно положить, что $D_{\text{опт}} - l_0F_{\text{опт}} > D - l_0F$ или $D_{\text{опт}} > D + l_0(F_{\text{опт}} - F)$. Тогда при $F \geq F_{\text{опт}}$ имеем $D_{\text{опт}} \geq D$ или $\hat{D}_{\text{опт}} \leq D$. Это означает, что оптимальная система диагностирования дает наименьшую вероятность пропуска неисправности среди всех систем диагностирования, у которых условная вероятность ложной тревоги не больше, чем у оптимальной [10].

Данное условие можно принять в качестве самостоятельного критерия оптимальности (аналогично критерию Неймана–Пирсона), который, по существу является следствием более общих критериев минимума среднего риска.

4 Киселев Д.Ю., Киселев Ю.В. Комплексный подход к моделированию процессов технического обслуживания авиационной техники // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219 (9). С. 33–40

5 Богомолова И.П., Самохвалов А.А., Рязанов А.Н., Шаров А.В. Управление ресурсосбережением на основе внедрения системы технической диагностики // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. №4. С. 304–306.

6 Болотин В.В. Прогнозирование и нормирование ресурса машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 7. С. 3–10.

7 Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Основы диагностики технических устройств и сооружений. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2015. 445 с.

8 Димитров В.П., Харахашян С.М. Метод определения последовательности элементарных проверок при диагностировании // Вестник аграрной науки Дона. 2011. № 1. С. 54–58

9 Малкин В.С. Техническая диагностика. М.: Лань. 2013. 272 с.

10 Спирина М.С., Спирин П.А. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Академия, 2011. 352 с.

REFERENCES

1 Mahitko V.P., Stepanov S.M., Stepanov D.S. Methods of providing reliability while aircraft maintenance and repair. *Nauchnyi vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies] 2007. no. 122. pp. 45–49 (in Russian)

2 Daletskiy S.V., Chinyuchin Yu.M., Oidov N. New principles of periodic aircraft maintenance conditions definition in accordance with aviation safety criteria *Nauchnyi vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies]. 2015. no. 219 (9). pp. 20–26 (in Russian)

3 Kiyak E. The Effects of Aircraft Preventive Maintenance on Reliability. *International journal of applied mathematics and informatics*. 2012. issue 1, vol. 6. pp. 9–16.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Ф. Астапенко магистр, мл. научный сотрудник, НИИИ (РЭБ), Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, hotfix18@yandex.ru

Дмитрий Н. Смирнов адъюнкт, кафедра метрологии и метрологического обеспечения вооружения и военной техники, Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, 48dimka54@mail.ru

Вадим И. Ткачев к.т.н., доцент, заместитель начальника кафедры, кафедра метрологии и метрологического обеспечения вооружения и военной техники, Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, vi-tkachev@mail.ru

Сергей Ю. Панов д.т.н., профессор, кафедра математики, Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, su-panov@yandex.ru

Сергей В. Лавров Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 11.05.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 10.08.2017

4 Kiselev D.Yu., Kiselev Yu.V. An integrated approach for modelling of aircraft maintenance processes *Nauchnyi vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies]. 2015. no. 219 (9). pp. 33–40 (in Russian)

5 Bogomolova I.P., Ryazanov A.N., Samokhvalov A.A., Sharov A.V. Manage resource conservation through the introduction a system of technical diagnostics. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies] 2013. no. 4. pp. 304–306. (in Russian)

6 Bolotin V.V. Prediction and regulation of a resource of cars. *Sborka v mashinostroenii* [Assembly in mechanical engineering, instrument making] 2009. no. 7. pp. 3–10. (in Russian)

7 Bigus G.A., Daniev Y.F., Bystrova N.A., Galkin D.I. Osnovy diagnostiki tekhnicheskikh ustroystv [Bases of diagnostics of technical devices and constructions] Moscow, MGTU, 2015. 445 p. (in Russian)

8 Dimitrov V.P., Karahasan S.M. Method of determining the sequence of elementary tests in the diagnosis. *Vestnik agrarnoi nauki Dona* [Bulletin of agricultural science of the Don] 2011. no. 1. pp. 54–58 (in Russian)

9 Malkin V.S. Tekhnicheskaya diagnostika [Technical diagnostics] Moscow, Lan. 2013. 272 p. (in Russian)

10 Spirina M.S., Spirin P.A. Teoriya veroyatnostei i statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics] Moscow, Academiya, 2011. 352 p. (in Russian).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Andrei F. Astapenko master of technical sciences, Junior researcher, Research department, Military educational and scientific center of the Air Force “The Air Force Academy. Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Starikh Bolshevikov str., Buiding 54a, Voronezh, 394064, Russia, hotfix18@yandex.ru

Dmitrii N. Smirnov adjunct, Department of Metrology and Metrological Support of Arms and Military Equipment, The military educational and scientific center of the Air Force “The Air Force Academy. Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Starikh Bolshevikov str., 54a, Voronezh, 394064, Russia, 48dimka54@mail.ru

Vadim I. Tkachev candidate of technical sciences, assistant professor, Metrology and Metrological Support of Arms and Military Equipment department, Military educational and scientific center of the Air Force “The Air Force Academy. Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Starikh Bolshevikov str., 54a, Voronezh, 394064, Russia, vi-tkachev@mail.ru

Sergei Yu. Panov doctor of technical sciences, professor, mathematic department, Military educational and scientific center of the Air Force “The Air Force Academy. Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Starikh Bolshevikov str., 54a, Voronezh, 394064, Russia, su-panov@yandex.ru

Sergey V. Lavrov Voronezh state university of engineering technologies, Revolution av., 19, Voronezh, 394036, Russia

CONTRIBUTION

All authors equally took part in writing the manuscript and are responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 5.11.2017

ACCEPTED 8.10.2017