



УДК 629.05
ГРНТИ 55.47.29

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ В ПОЛЕТЕ

А.В. БРЯЗГУНОВ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

М.Ф. ВОЛОБУЕВ, кандидат технических наук, доцент

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье разработана методика контроля бортовой системы управления летательного аппарата при его эксплуатации в полете. Методика заключается в построении дерева исходов при заданном количестве измерений за время полета, а также в априорной оценке условной вероятности ложной тревоги для одного измерения и определении необходимого количества ложных срабатываний подряд в интересах обеспечения требуемой вероятности ложной тревоги за весь полет. С использованием математического моделирования проведена сравнительная оценка вероятностей ложных тревог при ложном срабатывании в любом одном измерении и в двух подряд ложных срабатываниях.

Ключевые слова: бортовая система управления, постепенный отказ, контроль параметров, ложная тревога, ложное срабатывание.

METHOD OF THE AIRCRAFT BOARD MANAGEMENT SYSTEM CONTROL DURING ITS OPERATION IN FLIGHT

A.V. BRYAZGUNOV

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

M.F. VOLOBUEV, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

The article developed a method of the aircraft board management system control during its operation in flight. the method consists in building an outcome tree for a given number of measurements during the flight, as well as in a priori evaluation of the conditional probability of a false alarm for one measurement and determining the required number of false positives in a row in order to ensure the required probability of a false alarm for the entire flight. Using mathematical modeling, a comparative assessment of the probability of false alarms in case of a false alarm in any one dimension and in two consecutive false alarms was made.

Keywords: board management system, gradual failure, parameter control, false alarm, false signal.

Введение. Как известно, контроль состояния бортовых систем управления направлен на определение соответствия их параметров требованиям технической документации и определение на этой основе технического состояния в данный момент времени [1]. При этом контроль бортовых систем управления в полете, в отличие от наземного контроля, имеет ряд существенных особенностей, заключающихся в том, что принятие решений о состоянии системы производится по значительно меньшему количеству измерений, чем на земле, а также тем, что принятие ложного решения о состоянии системы может приводить к потере летательного аппарата (ЛА). Поэтому необходимо разработать методику контроля бортовых систем управления ЛА,



позволяющую обеспечить требуемую вероятность ложной тревоги в полете за допустимое количество измерений (выборку) из общего числа измерений.

Актуальность. В существующих бортовых системах управления летательных аппаратов контроль состояния производится с использованием схем логического резервирования, а принятие решения об их состоянии производится на каждом измерении [2,3]. Такой подход позволяет осуществлять контроль состояния бортовых систем ЛА при минимальных программных и аппаратных затратах. Однако, в том случае, когда количество измерений за время полета ЛА определяется десятками–сотнями тысяч, для обеспечения вероятности ложной тревоги в полете 10^{-2} , вероятность ложной тревоги в одном измерении должна составлять $10^{-6} \div 10^{-8}$. При таких значениях вероятности ложной тревоги порог, при превышении которого принимается решение об отказе системы, существенно увеличивается. Так для нормального закона распределения контролируемого параметра, значение порога составляет $(7 \div 9) \sigma$. Такое значение порога позволяет обнаруживать отказ при большом отклонении параметра от рабочего диапазона. Такое отклонение характерно для внезапных отказов типа «обрыв цепи» или «короткое замыкание». При этом, как показано в работе [4], обнаружение постепенных отказов практически невозможно. Соответственно, необходимо разработать методику контроля бортовых систем, позволяющую обеспечивать требуемую вероятность ложной тревоги и, соответственно, обнаруживать как внезапные отказы типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание», так и постепенные, т.е. отказы, для обнаружения которых значение порога не должно превышать 7σ .

Цель работы – разработка методики контроля бортовых систем управления ЛА, позволяющей обнаруживать постепенные и внезапные отказы в бортовых системах управления ЛА, с допустимой вероятностью ложной тревоги.

Рассмотрим исправную бортовую систему управления ЛА с одним контролируемым параметром. Измерения для определения состояния системы проводятся с типовой для бортовых систем управления ЛА периодичностью, от двух до четырех измерений в секунду. При этом, для принятия решения о состоянии системы располагаемая выборка составляет от одного до трех измерений. Количество срабатываний подряд, по которым принимается решение о состоянии системы, равно рассматриваемой выборке. Будем считать, что в начальный момент времени система исправна и принято правильное решение о её исправности. В качестве критерия исправности взят критерий Неймана-Пирсона [5], в котором фиксируется условная вероятность ложного решения. Данный критерий формирует правило, которое утверждает, что оптимальный обнаружитель, для которого фиксирована условная вероятность ложной тревоги, дает наибольшую условную вероятность необнаружения отказа по сравнению с любым другим обнаружителем.

При этом условная вероятность ложной тревоги в одном измерении равна P_j , условная вероятность правильного необнаружения отказа – P_i . Возможное дерево исходов, описывающее процесс принятия решений при трех независимых измерениях, представлено на рисунке 1, где «отк.» – принятое решение об отказе систем (ложная тревога), а «исп.» – принятое решение об исправности системы (правильное необнаружение отказа).

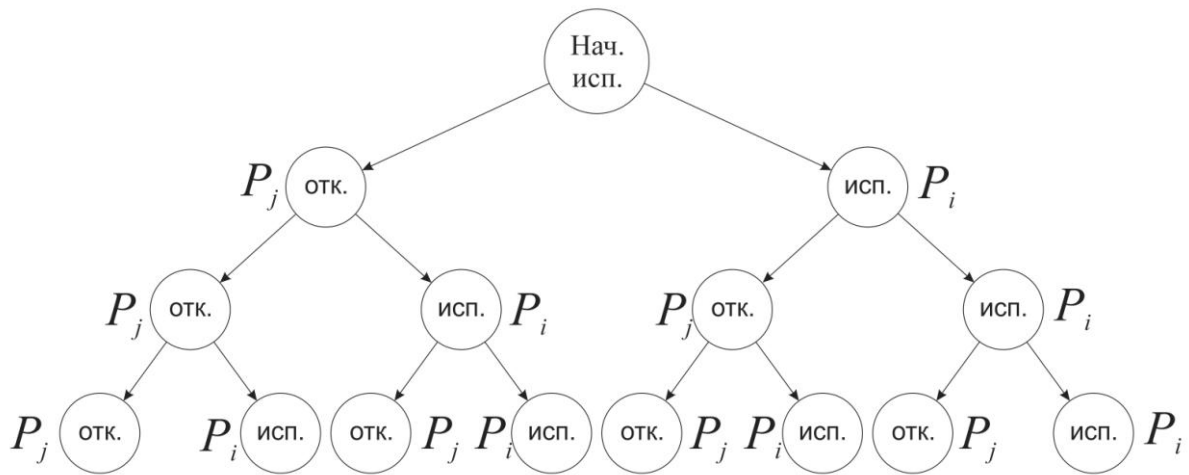


Рисунок 1 – Дерево возможных решений о состоянии бортовой системы управления ЛА

Как видно из рисунка 1, количество исходов, в которых возможна хотя бы одна ложная тревога, равно:

$$K_1(N) = 2^N - 1, \tag{1}$$

где N – количество измерений.

При этом вероятность ложной тревоги при одном ложном срабатывании равна:

$$P_{лт1}(N) = 1 - P_i^N. \tag{2}$$

В соответствии с введёнными выше допущениями, принятие решений о состоянии рассматриваемой системы возможно по одному, двум или трем срабатываниям.

Тогда используя методы комбинаторики, изложенные в [6], получим следующие выражения для количества исходов, в которых возможно принять ложное решение об отказе системы и вероятности ложной тревоги при двух подряд ложных срабатываниях:

$$K_2(N) = 2^N - \left(1 + (N-r+1) + \sum_{s=1}^{N-r-1} \frac{N!}{(N-s)! \cdot s!} - \frac{(s+1)!}{(2 \cdot s - N + 1)! \cdot (N-s)!} \right). \tag{3}$$

$$P_{лт2}(N) = P_j^N \cdot P_i^0 \cdot \delta(N-r) + (N-r+1) \cdot P_j^r \cdot P_i^{N-r} \cdot \delta(N-r+1) + \omega(N). \tag{4}$$

$$\omega(N) = \begin{cases} 0 \mapsto N < 4 \\ \sum_{s=1}^{N-r-1} \left(\frac{N!}{(N-s)! \cdot s!} - \frac{(s+1)!}{(2 \cdot s - N + 1)! \cdot (N-s)!} \right) \cdot \delta(2 \cdot s - N + r - 1) \cdot P_i^s \cdot P_j^{N-s} \mapsto N \geq 4, \end{cases} \tag{5}$$

где $\delta(\)$ – функция Хевисайда; $N!$ – факториал количества измерений; s – переменная, изменяющаяся от 1 до $N-r-1$; r – количество ложных срабатываний подряд.

В работе не получено выражение для расчета количества возможных исходов, в которых будет зафиксирована ложная тревога и вероятности ложной тревоги для трех ложных срабатываний подряд при переменном количестве измерений. Однако, для небольшого числа измерений ($N = 10$) количество исходов, в которых будет принято ложное решение об отказе системы, и вероятность ложной тревоги равны:



$$K_3(N) = 2^N - \left(\sum_{s=10}^8 \frac{10!}{s!(10-s)!} + \left(\frac{10!}{3! \cdot 7!} - 2 \right) + \left(\frac{10!}{4! \cdot 6!} - 16 \right) + \left(\frac{10!}{5! \cdot 5!} - 56 \right) + \left(\frac{10!}{6! \cdot 4!} - 126 \right) + 8 \right). \quad (6)$$

$$P_{\text{ЛТЗ}}(10) = \sum_{s=10}^8 \frac{10!}{s!(10-s)!} P_j^s \cdot P_i^{(10-s)} + \left(\frac{10!}{3! \cdot 7!} - 2 \right) \cdot P_j^7 \cdot P_i^3 + \left(\frac{10!}{4! \cdot 6!} - 16 \right) \cdot P_j^6 \cdot P_i^4 + \left(\frac{10!}{5! \cdot 5!} - 56 \right) \cdot P_j^5 \cdot P_i^5 + \left(\frac{10!}{6! \cdot 4!} - 126 \right) \cdot P_j^4 \cdot P_i^6 + 8 \cdot P_j^3 \cdot P_i^7 \quad (7)$$

В соответствии с выражениями (1), (3), (6) количество исходов, в котором возможно принятие ложного решения о состоянии системы при десяти измерениях и одном ложном срабатывании $K_1(10) - 1023$, двух ложных срабатываний подряд $K_2(10) - 880$ и трех ложных срабатываний подряд $K_3(10) - 656$.

Результаты сравнительной оценки вероятностей ложных тревог при одном срабатывании и двух срабатываниях подряд для случая, когда условная вероятность ложной тревоги при одном измерении P_j равна 0,1, а условная вероятность необнаружения отказа P_i равна 0,9, представлены на рисунке 2.

Анализ приведенных на рисунке 2 зависимостей показывает, что принятие решения о состоянии системы по двум срабатываниям (сплошная линия) позволяет существенно снизить вероятность ложной тревоги, по сравнению с принятием решения по одному срабатыванию (прерывистая линия). При этом, увеличение количества измерений для принятия решений о состоянии системы не влияет на значение порога, что в свою очередь позволяет повысить эффективность обнаружения постепенных отказов за счет применения способов их обнаружения, изложенных в [3].

Однако, необходимо учитывать, что увеличение количества измерений приводит к увеличению времени воздействия отказа на бортовую систему управления ЛА и может приводить к катастрофическим последствиям.

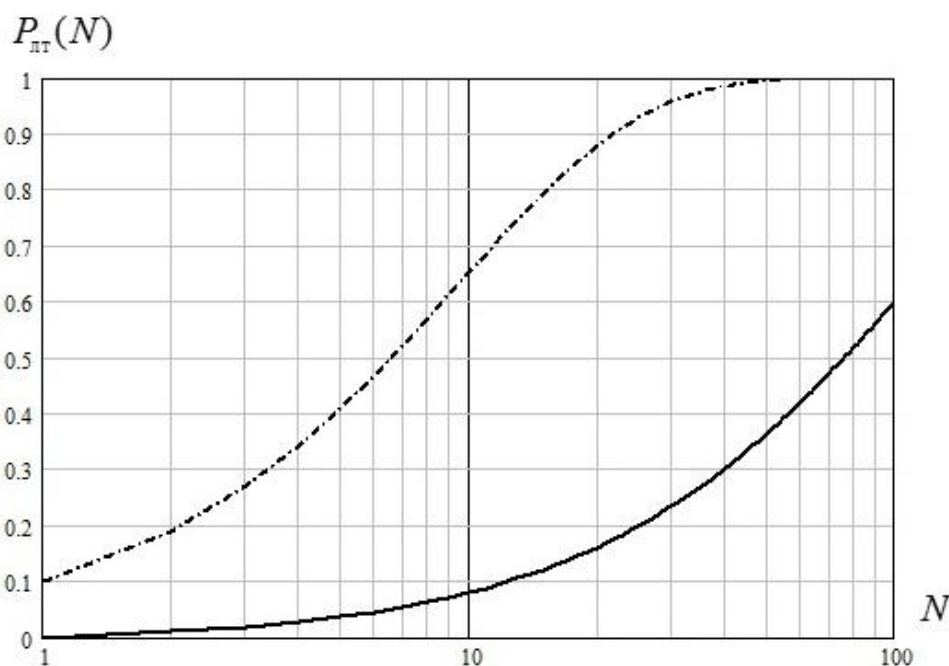


Рисунок 2 – Зависимость вероятностей ложных тревог при одном ложном срабатывании (прерывистая линия) и двух ложных срабатываниях подряд (сплошная линия)



В соответствии с проведенным анализом, разрабатываемая методика контроля бортовой системы управления ЛА должна включать следующие последовательные шаги:

1. Формирование блока исходных данных. При формировании блока исходных данных необходимо определить максимально допустимую вероятность ложной тревоги за весь полет $P_{ЛТ}(N_{\max})$. Определить максимально допустимую выборку измерений (r_{\max}) из общего их числа, за которую принимается решение о состоянии системы. При этом количество измерений должно определяться из условия ненаступления катастрофических последствий для ЛА при воздействии отказов на бортовую систему, за время, которое затрачено на формирование необходимой выборки.

2. Определение количества измерений за весь полет N_{\max} .

3. Построение дерева возможных исходов, где общее количество исходов определяется в соответствии с выражением:

$$K(N) = 2^N. \quad (8)$$

4. Расчет вероятности ложной тревоги для возможного количества измерений за весь полет $P_{ЛТr}(N)$ при изменении допустимой выборки (количества срабатываний подряд) от 1 до максимально допустимого значения r_{\max} , соответственно $r = 1, 2, 3 \dots \max$.

5. Определение минимального количества срабатываний подряд r_{\min} , при котором обеспечивается требуемая вероятность ложной тревоги за весь полет.

Разработанную методику, включающую приведенные выше последовательные шаги, возможно представить в виде структурной схемы.

Структурная схема методики контроля бортовой системы управления ЛА представлена на рисунке 3.

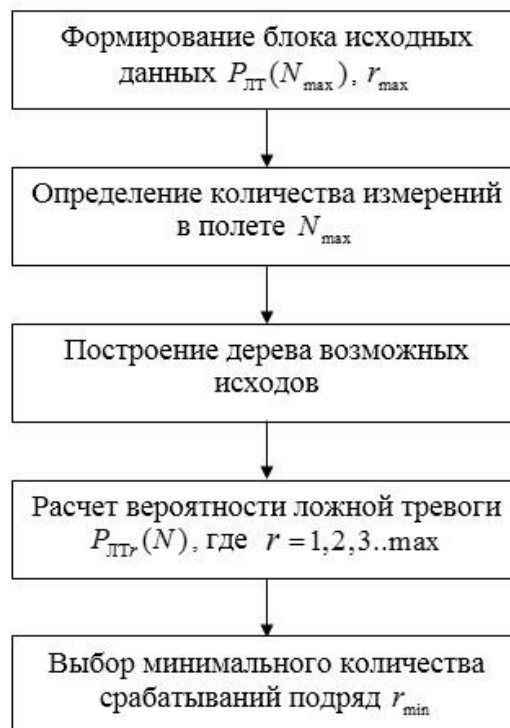


Рисунок 3 – Структурная схема методики контроля бортовой системы управления ЛА

Выводы. Анализ полученных результатов показывает, что разработанная методика контроля бортовой системы управления летательного аппарата позволяет существенно снизить ве-



роятность ложной тревоги в полете, за счет увеличения количества срабатываний подряд в допустимом количестве измерений, по которым принимается решение о состоянии системы. Так, при десяти измерениях, когда возможны 1024 различных исхода, принятие решения по трем срабатываниям подряд снижает количество исходов, в которых возможно принятие ложного решения, на 35 % (368), а по двум срабатываниям подряд на 14 % (144). При этом быстрдействие современных средств контроля составляет единицы–десятки измерений в секунду, поэтому в случае принятия решений о состоянии системы по 2÷5 срабатываниям подряд, соответственно 2÷5 измерениям, отказ будет воздействовать на бортовую систему управления менее секунды, что не приведет к катастрофическим последствиям для ЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернодаров А.В. Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов // Москва: ООО «Научтехлитиздат», 2017. 300 с.
2. Оболенский Ю.Г. Управление полетом маневренных самолетов // Москва: филиал Воениздат, 2007. 480 с.
3. Волобуев М.Ф. Методы логического резервирования систем управления сложными техническими объектами: теория практика // Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. 294 с.
4. Волобуев М.Ф., Мальцев А.М., Соколов И.В. Экспериментальные исследования макета резервированной системы, управляемой нечетким контроллером // Информационные технологии. Т. 23. № 7. 2017. С. 491–498.
5. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем // Москва: «Советское радио», 1977. 432 с.
6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов // Москва: «Наука», 1980. 976 с.

REFERENCES

1. Chernodarov A.V. Kontrol', diagnostika i identifikaciya aviacionnyh priborov i izmeritel'no-vychislitel'nyh kompleksov // Moskva: ООО «Nauchtehlitizdat», 2017. 300 p.
2. Obolenskij Yu.G. Upravlenie poletom manevrennyh samoletov // Moskva: filial Voenizdat, 2007. 480 p.
3. Volobuev M.F. Metody logicheskogo rezervirovaniya sistem upravleniya slozhnymi tehničeskimi ob'ektami: teoriya praktika // Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2017. 294 p.
4. Volobuev M.F., Mal'cev A.M., Sokolov I.V. 'Eksperimental'nye issledovaniya maketa rezervirovannoj sistemy, upravlyajemoj nechetkim kontrollerom // Informacionnye tehnologii. T. 23. № 7. 2017. pp. 491–498.
5. Repin V.G., Tartakovskij G.P. Statisticheskij sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptaciya informacionnyh sistem // Moskva: «Sovetskoe radio», 1977. 432 p.
6. Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchaschihsya VTUZov // Moskva: «Nauka», 1980. 976 p.

© Брызгунов А.В., Волобуев М.Ф., 2019

Брызгунов Андрей Владимирович, начальник отделения подготовки данных УТК, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, Ander2010@yandex.ru.

Волобуев Михаил Федорович, кандидат технических наук, доцент, докторант, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, volmf81@mail.ru.