

УДК 623.746.-519; 681.518.5

**Модель локализации отказов в аппаратуре системы управления
беспилотного летательного аппарата при использовании
гибкого алгоритма функционирования в полете**

Морозов Д.В.*., Чермошенцев С.Ф.**

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева, КНИТУ - КАИ,

ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия

* *e-mail: i_am_morozov@mail.ru*

** *e-mail: sapr@kai.ru*

Аннотация

Разработана модель процесса локализации отказа бортовой контрольно-проверочной аппаратуры системы управления беспилотного летательного аппарата, при ее самоконтроле. Модель представлена в форме графа. Граф является политохомическим деревом решений. Получены выражения для вероятности ложного забракования, вероятности ложного пропуска отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре, позволяющие решить задачу определения оптимальной глубины локализации отказов, с учетом пересечения элементарных самопроверок и применить гибкий алгоритм функционирования к системе управления беспилотного летательного аппарата в полете, для выполнения конечной задачи целевого применения. Полученные в общем виде аналитические выражения для соответствующих решений учитывают состояния функциональных

составляющих: бортовая контрольно-проверочная аппаратура, системы самоконтроля, подозреваемой на отказ область элементов, контролируруемую область элементов, а также процесс изменения контролируемой области элементов.

Ключевые слова: контролируемая область элементов, подозреваемая на отказ область элементов, самоконтроль, вероятность ложного забракования, вероятность ложного пропуска отказа, комбинаторные подмножества элементов, элементарная операция, система управления, беспилотный летательный аппарат.

Введение

Применение управляющей цифровой вычислительной машины в системе управления (СУ) позволило резко расширить количество выполняемых функций и задач беспилотным летательным аппаратом (БЛА). На борт были переданы не только функции контроля и диагностического самоконтроля, но и полностью перевести полет БЛА в автоматический режим. Насыщение СУ БЛА микроэлектроникой привело к возникновению и обострению ряда проблем: увеличилась чувствительность к электромагнитным воздействиям (ЭМВ) как естественного (природного) происхождения ЭМВ так и искусственного происхождения, электромагнитной совместимости на борту [1-14]. Это, как следствие, привело к увеличению количества отказов в СУ БЛА.

В соответствии с [15] СУ БЛА состоит из бортовой контрольно-проверочной аппаратуры (БКПА), системы ее самоконтроля (ССК) и бортовой аппаратуры (БА) выполнения задач целевого применения. Поскольку решение каждой задачи требует

выполнения некоторой совокупности операций управления и контроля, реализуемых соответствующими техническими средствами, то БКПА СУ, имеет в своем составе аппаратуру контроля (АК): работоспособности (АКР), функционирования (АКФ) и аварийного режима полета БЛА (АП) [16,17].

Отказы, возникшие в различных функциональных частях, не принадлежащих АП, не приводят к отказу всей СУ, а переводят ее в состояние, характеризующееся способностью выполнять частные задачи, т.е. СУ обладает возможностью функционировать с разными уровнями эффективности. Многофункциональность аппаратуры СУ, отказы элементов которой в различной степени влияют на эффективность выполнения отдельных задач, указывает на то, что результаты контроля аппаратуры СУ в полете могут и должны использоваться для выбора наиболее эффективного варианта ее применения [16-21].

Целью данной работы является построение вероятностной модели процесса локализации отказа бортовой контрольно-проверочной аппаратуры системы управления беспилотного летательного аппарата в полете, при ее самоконтроле, учитывающая функциональный состав СУ БЛА и позволяющая получить математические выражения характеристик достоверности самоконтроля. На основании этого выбрать оптимальный алгоритм функционирования СУ БЛА в полете, с отказом в СУ, и выполнить задачу(и) целевого применения.

Модель процесса локализации отказа бортовой контрольно-проверочной аппаратуры системы управления беспилотного летательного аппарата

В [16] предложена бинарная иерархическая модель (БИМ) СУ БЛА. Она представляет собой разбиение СУ на локальные функциональные части, вызвана необходимостью оценки их влияния на конечный результат процесса выполнения задач целевого применения СУ БЛА в полете и возможностью осуществления процедуры изменения алгоритма ее функционирования. Для построения вероятностной модели введем ряд определений.

Каждая операция реализуется своей совокупностью элементов, которые, в общем случае, пересекаются между собой [16]. Пересечение этих элементов образуют разбиение БКПА на непересекающиеся между собой комбинаторные подмножества элементов (КПЭ), каждое из которых реализует вполне определенную совокупность элементарных операций.

Определение 1. Элементарная операция (ЭО) это максимальная совокупность действий над сигналами, неизменная во всех задачах (реализуемая полностью при выполнении любой задачи), реализуемая под управлением ЦВМ и (или) человека – оператора.

Определение 2. Элементарной самопроверкой (ЭС) называется совокупность ЭО необходимых и достаточных для контроля отдельного параметра (признака) БКПА при ее самоконтроле.

Определение 3. Контролируемая область элементов (КОЭ) – совокупность (подмножество) КПЭ БКПА, покрываемая i -ой ЭС

$$\{ b_i, \dots, b_i \} \in \mathfrak{A}_i .$$

Определение 4. Подозреваемая на отказ область элементов (ПОЭ) - это область КПЭ(а), образованная в результате пересечения $\bar{\mathfrak{A}}_i$ i -ой ЭС, в которой зафиксирован отказ с \mathfrak{A}_j предыдущих ЭС

$$\{ b_j \} \in \bar{\mathfrak{A}}_i \cap \mathfrak{A}_j \in \mathfrak{C} ,$$

где $\bar{\mathfrak{A}}_i$ - КОЭ i -ой ЭС, в которой зафиксирован отказ;

\mathfrak{A}_j , $j = \overline{1, i-1}$ - КОЭ ЭС, выполненных до проведения i -ой ЭС и, в которых получен результат "годен".

При реализации ЭС в ходе проведения самоконтроля БКПА может иметь место случай, когда $\mathfrak{A}_j = \emptyset$, т.е. ПОЭ совпадает с КОЭ i -ой ЭС.

Определение 5. Элементарные проверки (ЭП), обеспечивающие выполнение задачи управления СУ БЛА в аварийном режиме полета называются основными.

Остальные ЭП относятся к вспомогательным. Каждой ЭП поставлена в соответствие ЭС.

При разработке модели учитывались следующие допущения:

средства самоконтроля БКПА обеспечивают возможность раздельной проверки функциональных частей БКПА (САК, САП);

отказы, обусловленные функционированием аппаратуры за время проведения самоконтроля БКПА, не возникают;

при проведении очередной ЭС область проверок, покрывающая \mathfrak{C} , является сужающейся;

в \mathcal{C} и \mathcal{X}_i ; возможен отказ КПЭ, принадлежащего только одной функциональной части БКПА (либо АК, либо АП);

возможен отказ средств самоконтроля БКПА только одной функциональной части БКПА (САК либо САП);

инструментальная составляющая достоверности, обусловленная конечной точностью средств самоконтроля БКПА, равна единице.

С учетом этих допущений модель процесса локализации отказа БКПА при ее самоконтроле может быть представлена в форме графа изображенного на рис. 1.

Граф является политохомическим деревом решений, где вершины отображают функциональный состав КПЭ в \mathcal{X}_i , \mathcal{C} и события (результаты выполнения i -ой ЭС и принимаемые по этим результатам решения); дуги - вероятности перехода состояний и событий. На первом уровне графа размещаются вершины, отображающие семейство ЭС из области проверок, покрывающие \mathcal{C} ; второй уровень содержит вершины, каждая из которых определяет признак i -ой ЭС (основная или вспомогательная); вершины третьего уровня - определяют принадлежность КПЭ к функциональному составу БКПА данной i -ой ЭС; четвертый уровень содержит вершины, отображающие несовместные гипотезы о состоянии КПЭ, составляющих \mathcal{X}_i ; пятый уровень - события, отражающие пространство исходов i -ой ЭС ("норма" - "не норма"); шестой уровень - остаток КПЭ в \mathcal{C} , после проведения i -ой ЭС (функциональную принадлежность БКПА); седьмой уровень - гипотезы о состоянии остатка функциональных частей КПЭ КПА в \mathcal{C} ; восьмой уровень - вершины, характеризующие возможные принимаемые решения. В обозначениях вершин графа

принято: первая цифра указывает уровень, на котором находится вершина, а вторая -
порядок нумерации в уровне.

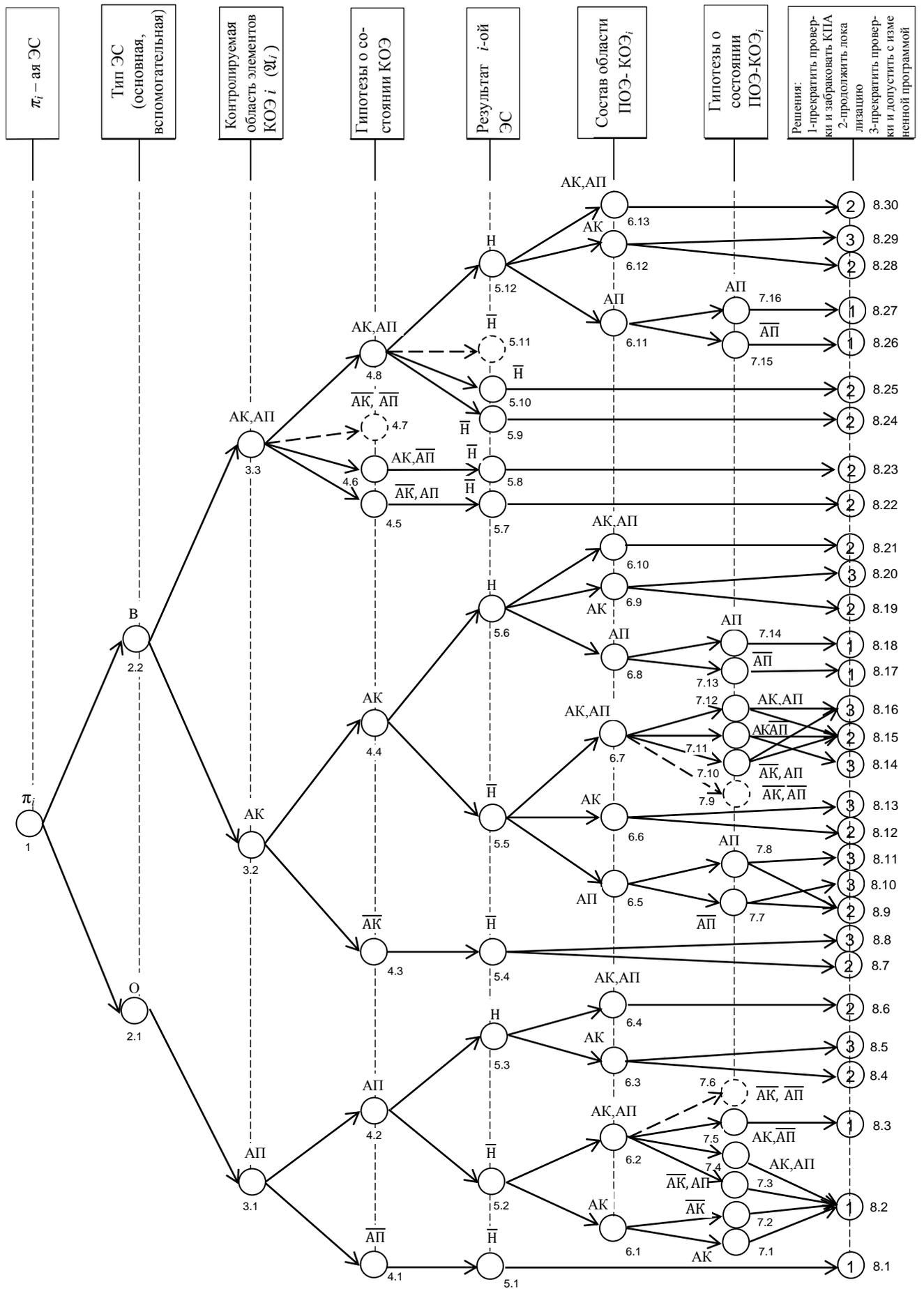


Рисунок 1. Модель процесса локализации отказа БКПА СУ БЛА при ее самоконтроле в полете

В зависимости от типа проверок, функциональной принадлежности КПЭ, входящих в \mathcal{U}_i и \mathcal{C} , результата i -ой ЭС могут приниматься следующие решения:

1- прекратить проверки и забраковать БКПА;

2- продолжить локализацию отказа;

3- прекратить локализацию отказа и продолжить выполнение СУ БЛА программы полета по измененному алгоритму.

Для характеристики i -ой ЭС, перехода из вершины 1 в вершины 2.1 и 2.2 введем двоичную переменную δ_1^i , значение которой определим следующим образом:

$$\delta_1^i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ая ЭС основная;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В общем случае в семействе ЭС, покрывающих \mathcal{C} , могут иметь место ЭС контролирующие $\{ b_j \} \in \text{АП БКПА}$, т.е. ЭС элементов БКПА, участвующих в контроле аппаратуры аварийного режима полета БЛА.

Вероятности перехода в состояния 2.1 и 2.2 определяются:

$$P(2.1) = \delta_1^i;$$

$$P(2.2) = 1 - \delta_1^i.$$

Направленность вспомогательных проверок на функции контроля определяет в \mathcal{C} , при самоконтроле БКПА, присутствие КПЭ, принадлежащих не только функциональной части АК, но и АП БКПА.

То есть при проведении i -ой ЭС в \mathcal{U}_i могут находиться КПЭ \in АК и

КПЭ \in АК, АП. Поэтому для вспомогательных ЭС вводится двоичная переменная δ_2^i :

$$\delta_2^i = \begin{cases} 1, & \text{если в } A_i \text{ находятся } \{ b_i \} \in \text{АК}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Из вышеизложенного следует, что переход из вершины 2.1 в 3.1 определяется вероятностью:

$$P(3.1) = 1,$$

а из вершины 2.2 в 3.2 и 3.3 - условной вероятностью

$$P(3.2) = \delta_2^i;$$

$$P(3.3) = 1 - \delta_2^i.$$

Для вершин 3.1 и 3.2, характеризуемых наличием в \mathfrak{A}_i КПЭ, принадлежащих только АП или АК, соответствуют по две несовместные гипотезы о состоянии КПЭ этих функциональных частей. Этим гипотезам ставятся в соответствие вершины 4.1-4.4.

Для \mathfrak{A}_i которая состоит из КПЭ как АК, так и АП, существуют четыре несовместные гипотезы о состоянии этих функциональных частей (вершины 4.5-4.8).

Каждая гипотеза образована комбинацией суждений о наличии или отсутствии отказов в КПЭ, принадлежащих соответствующим функциональным частям КПА (штрих над аббревиатурой соответствующих КПЭ, составляющих \mathfrak{A}_i означает наличие в ней отказа) и определяется следующей условной вероятностью:

$$P(4.1) = 1 - P_{АП_i};$$

$$P(4.2) = P_{АП_i} ;$$

$$P(4.3) = 1 - P_{АК_i} ;$$

$$P(4.4) = P_{АК_i} ;$$

$$P(4.5) = P_{АП_i} (1 - P_{АК_i}) ;$$

$$P(4.6) = P_{АК_i} (1 - P_{АП_i}) ;$$

$$P(4.8) = P_{АП_i} P_{АК_i} ,$$

где и $P_{АП_i}$, $P_{АК_i}$ - условные вероятности отсутствия отказа в $\{ b_i \} \in \mathfrak{A}_i$.

Эти вероятности рассчитываются по формуле Байеса [22], т.к. в состав i -ой ЭС могут входить КПЭ, принадлежащие и предыдущим проверкам, в которых получен результат "норма".

В соответствии с допущениями модели гипотеза о состоянии \mathfrak{A}_i (вершина 4.7) не рассматривается.

По результатам проведенной i -ой ЭС может произойти одно из двух событий:

получен результат "норма" (состояния 5.3; 5.6; 5.12);

получен результат "не норма" (состояния 5.2; 5.4; 5.5; 5.7; 5.8; 5.9; 5.10; 5.11).

Переход от состояния 4.1 к событию 5.1 характеризует наличие отказа в КПЭ и определяется вероятностью:

$$P(5.1) = 1.$$

Из состояния 4.2 может быть получено два события 5.2 и 5.3. Причем событие 5.2 характеризуется наличием отказа в САПП, а событие 5.3 - исправностью средств САПП.

Наступление событий 5.2 и 5.3 определяется следующими вероятностями:

$$P(5.2) = 1 - R_{АПi};$$

$$P(5.3) = R_{АПi},$$

где $R_{АПi}$ - априорная вероятность отсутствия отказа в средствах САПП, участвующих в самоконтроле $\{ b_i \} \in \mathfrak{X}_i$. Аналогичным образом определяются вероятности для событий:

$$P(5.4) = 1;$$

$$P(5.5) = 1 - R_{АКi};$$

$$P(5.6) = R_{АКi},$$

где $R_{АКi}$ - априорная вероятность отсутствия отказа в средствах САК, участвующих в самоконтроле $\{ b_i \} \in \mathfrak{X}_i$. Переход от гипотез в вершинах 4.5, 4.6 к событиям 5.7 и 5.8 характеризует существование отказа в КПЭ \mathfrak{X}_i , принадлежащих соответствующим функциональным частям БКПА. В этом случае вероятности наступления событий 5.7 и 5.8 определяются

$$P(5.7) = P(5.8) = 1.$$

В предположении гипотезы 4.8 соответствует наступление четырех событий, которые определяются исправностью соответствующих средств самоконтроля САК и САПП.

События 5.9 - 5.12 определяются следующими вероятностями:

$$P(5.9) = R_{АПi} (1 - R_{АКi});$$

$$P(5.10) = R_{АКi} (1 - R_{АПi});$$

$$P(5.11) = 1 - R_{АПi} R_{АКi};$$

$$P(5.12) = R_{АПi} R_{АКi}.$$

В соответствии с допущениями, принятыми в модели, событие 5.11 не рассматриваем.

На основании принадлежности КПЭ, находящихся в \mathfrak{X}_i , функциональной части АП БКПА, гипотезе 4.1 о состоянии \mathfrak{X}_i и полученному результату i -ой ЭС (5.1) принимается решение о прекращении самоконтроля и забракования БКПА, т.е. имеет место отказ КПЭ части АП БКПА.

Если имеют место гипотезы 4.5, 4.6 (о состоянии \mathfrak{X}_i) и события 5.7, 5.8, принимается решение продолжать самоконтроль БКПА. Аналогичное решение принимается при гипотезе 4.8 и событиях 5.9 и 5.10. При этом вероятности принятия соответствующих решений равны:

$$P(8.1) = 1;$$

$$P(8.22) = P(8.23) = 1;$$

$$P(8.24) = P(8.25) = 1.$$

В остальных событиях (5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.12) результат, полученный после окончания i -ой ЭС, отображается на оставшуюся область S . В этом случае вводятся следующие двоичные переменные:

$$\delta_3^i = \begin{cases} 1, \text{ если в оставшейся } S, \text{ только } \{b_j\} \in АК; \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

$$\delta_4^i = \begin{cases} 1, \text{ если в оставшейся } S, \text{ только } \{b_j\} \in АП; \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

$$\delta_5^i = \begin{cases} 1, & \text{если в оставшейся } \mathcal{C}, \text{ имеются } \{ b_j \} \in \text{АК, АП;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

При получении события 5.2 из \mathcal{A}_i (состояния 3.1), в оставшейся части \mathcal{C} , могут быть только $\{ b_j \} \in \text{АК}$ (состояние 6.1) так и $\{ b_j \} \in \text{АП, АК}$ (состояние 6.2) с условными вероятностями:

$$P(6.1) = \delta_3^i;$$

$$P(6.2) = \delta_5^i.$$

Аналогично определяются условные вероятности для состояний 6.3 и 6.4, которые получаются из анализа состояния 3.1 и события 5.3:

$$P(6.3) = \delta_3^i;$$

$$P(6.4) = \delta_5^i.$$

Если в \mathcal{A}_i имеются $\{ b_j \} \in \text{АК}$ или $\{ b_j \} \in \text{АК, АП}$, то в оставшейся части \mathcal{C} могут находиться и $\{ b_j \} \in \text{АП}$. В этом случае состояние оставшейся части \mathcal{C} отображается вершинами 6.5-6.13 и условные вероятности этих состояний определяются

$$P(6.5) = P(6.8) = P(6.11) = \delta_4^i;$$

$$P(6.6) = P(6.9) = P(6.12) = \delta_3^i;$$

$$P(6.7) = P(6.10) = P(6.13) = \delta_5^i.$$

В предположении, что имеется гипотеза 4.3 и получение события 5.4, возможны следующие решения: либо продолжать самоконтроль БКПА, т.к. отказ

принадлежит функциональной части БКПА, участвующей только в контроле работоспособности БА СУ (решение 2), либо прекратить локализацию отказа и продолжить выполнение СУ программы полета БЛА по измененному алгоритму (решение 3). Поэтому необходимо ввести следующие двоичные переменные:

$$\delta_6 = \begin{cases} 1, & \text{если принимается решение 2;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

$$\delta_7 = \begin{cases} 1, & \text{если принимается решение 3;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В этом случае, если имеет место событие 5.4, события 8.7 и 8.8 определяются условными вероятностями

$$P(8.7) = \delta_6;$$

$$P(8.8) = \delta_7 .$$

Необходимость различения состояния оставшейся части С обусловлена тем, что с учетом получения результата i -ой ЭС, возможно принятие соответствующих решений о самоконтроле БКПА.

Так, имея состояния остатка С, после i -ой ЭС 6.3, 6.9 и 6.12 при одинаковых результатах i -ой ЭС, события 5.3, 5.6, 5.12 можно выбрать решение 2, либо решение 3 с условными вероятностями:

$$P(8.4) = P(8.19) = P(8.28) = \delta_6;$$

$$P(8.5) = P(8.20) = P(8.29) = \delta_7 .$$

Если получено событие 5.5, что соответствует результату i -ой ЭС "не норма", \mathcal{X}_i которой состоит из КПЭ \in АК, то при анализе оставшейся части С, состоящей

также только из КПЭ \in АК, принимается решение 2 или решение 3, с условными вероятностями:

$$P(8.12) = \delta_6;$$

$$P(8.13) = \delta_7 .$$

При анализе оставшейся части С , в которой имеются КПЭ \in АК, АП (состояния 6.4, 6.10, 6.13) и событий 5.3, 5.6, 5.12 принимается решение 2, т.е.

$$P(8.6) = P(8.21) = P(8.30) = 1.$$

Состояниям 6.1, 6.5, 6.8, 6.11 (оставшейся части С) соответствуют по две несовместные гипотезы о наличии или отсутствии отказа в оставшейся части С .

Для состояний 6.2, 6.7 - четыре несовместные гипотезы, где штрих над соответствующей частью означает наличие в ней отказа. Вероятности нахождения оставшейся части С в состояниях 7.1-7.16 оцениваются соответствующими вероятностями, вычисляемые по формуле Байеса [22]

$$P(7.1) = \Phi_{AK}^* ;$$

$$P(7.2) = 1 - \Phi_{AK}^* ;$$

$$P(7.3) = P(7.10) = \Phi_{АП}^* (1 - \Phi_{AK}^*);$$

$$P(7.4) = P(7.12) = \Phi_{AK}^* \Phi_{АП}^* ;$$

$$P(7.5) = P(7.11) = \Phi_{AK}^* (1 - \Phi_{АП}^*);$$

$$P(7.7) = P(7.13) = P(7.15) = 1 - \Phi_{АП}^* ;$$

$$P(7.8) = P(7.14) = P(7.16) = \Phi_{АП}^* .$$

В предположении гипотез 7.1-7.5, 7.13,7.14, 7.15 и 7.16 о состоянии оставшейся после i -ой ЭС части С принимается решение 1. Однако, с учетом типа i -ой ЭС, ее результатов, гипотез о состоянии оставшейся части С может быть принято ложное решение о браковании БКПА (событие 8.2, в предположении гипотез 7.1, 7.2, 7.3, 7.4; событие 8.18 - гипотеза 7.14 и событие 8.27 - гипотеза 7.16).

Гипотезы 7.6, 7.19 не рассматриваются как маловероятные, в связи с допущениями модели.

Если имеют место гипотезы 7.7, 7.8, 7.10, 7.11, 7.12 о состоянии оставшейся части С, может быть принято решение 2 или решение 3 (события 8.9, 8.15, 8.10, 8.11, 8.14, 8.16, соответственно). Причем, события 8.10 и 8.14 характеризуют наличие необнаруженного отказа в \mathcal{A}_i , при проведении i -ой ЭС.

В случае гипотезы 7.7 возможен переход к событиям 8.9 и 8.10 с условными вероятностями:

$$P(8.9) = \delta_6;$$

$$P(8.10) = \delta_7 .$$

Аналогично для гипотезы 7.8 и событий 8.9 и 8.10

$$P(8.9) = \delta_6;$$

$$P(8.10) = \delta_7 .$$

Гипотезы 7.10, 7.11 и 7.12 могут привести к событиям 8.15, 8.16; 8.15, 8.14; 8.15, 8.16 соответственно с условными вероятностями:

а) для гипотезы 7.10

$$P(8.15) = \delta_6;$$

$$P(8.16) = \delta_7 ,$$

б) гипотеза 7.11, имеет

$$P(8.14) = \delta_7 ;$$

$$P(8.15) = \delta_6,$$

в) гипотеза 7.12, имеет

$$P(8.15) = \delta_6;$$

$$P(8.16) = \delta_7 .$$

Просуммировав все ветви графа, ведущие к событиям 8.2, 8.18, 8.27 определим $P_{Л.з.}(i)$, в общем виде

$$\begin{aligned} P_{Л.з.}(i)(8.2, 8.18, 8.27) = & P(2.1)P(3.1)P(4.2)P(5.2) \times \\ & \times P(6.1)P(7.1)P(8.2) + P(2.1)P(3.1)P(4.2)P(5.2) \times \\ & \times P(6.1)P(7.2)P(8.2) + P(2.1)P(3.1)P(4.2)P(5.2) \times \\ & \times P(6.2)P(7.3)P(8.2) + P(2.1)P(3.1)P(4.2)P(5.2) \times \quad (1) \\ & \times P(6.2)P(7.4)P(8.2) + P(2.2)P(3.2)P(4.4)P(5.6) \times \\ & \times P(6.8)P(7.17)P(8.18) + P(2.2)P(3.3)P(4.8) \times \\ & \times P(5.12)P(6.11)P(7.16)P(8.27), \end{aligned}$$

где $P_{Л.з.}(i)$ - вероятность ложного забракования БКПА при проведении i -ой ЭС.

Подставив в выражение (1) значения соответствующих вероятностей, имеем

$$\begin{aligned}
P_{\text{Л.3.}}(i) = & \delta_1^i \delta_3^i P_{\text{АП}_i} (1 - R_{\text{АП}_i}) \Phi_{\text{АК}}^* + \delta_1^i \delta_3^i P_{\text{АП}_i} (1 - R_{\text{АП}_i}) (1 - \Phi_{\text{АК}}^*) + \\
& + \delta_1^i \delta_5^i P_{\text{АП}_i} (1 - R_{\text{АП}_i}) \Phi_{\text{АП}}^* (1 - \Phi_{\text{АК}}^*) + \delta_1^i \delta_5^i P_{\text{АП}_i} (1 - R_{\text{АП}_i}) \times \\
& \times \Phi_{\text{АП}}^* \Phi_{\text{АК}}^* + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_4^i P_{\text{АК}_i} R_{\text{АК}_i} \Phi_{\text{АП}}^* + (1 - \delta_1^i) (1 - \delta_2^i) \times \\
& \times P_{\text{АП}_i} P_{\text{АК}_i} R_{\text{АП}_i} R_{\text{АК}_i} \delta_4^i \Phi_{\text{АП}}^* .
\end{aligned} \tag{2}$$

После соответствующих преобразований выражение (2) примет вид

$$\begin{aligned}
P_{\text{Л.3.}}(i) = & \delta_1^i (\delta_3^i + \delta_5^i \Phi_{\text{АП}}^*) P_{\text{АП}_i} (1 - R_{\text{АП}_i}) + (1 - \delta_1^i) \delta_4^i P_{\text{АК}_i} R_{\text{АК}_i} \times \\
& \times \Phi_{\text{АП}}^* (\delta_2^i + (1 - \delta_2^i) P_{\text{АП}_i} R_{\text{АП}_i}) .
\end{aligned} \tag{3}$$

Просуммировав все ветви графа, ведущие к событиям 8.10, 8.14, определим P

$P_{\text{Л.П.}}(i)$

$$\begin{aligned}
P_{\text{Л.П.}}(i) = & P(2.2) P(3.2) P(4.4) P(5.5) P(6.5) P(7.7) \times \\
& \times P(8.10) + P(2.2) P(3.2) P(4.4) P(5.5) \times \\
& \times P(6.7) P(7.11) P(8.14) ,
\end{aligned} \tag{4}$$

где $P_{\text{Л.П.}}(i)$ - вероятность ложного пропуска отказа в БКПА при проведении i -ой ЭС.

Подставляя в выражение (4) значения соответствующих вероятностей, получим

$$\begin{aligned}
P_{\text{Л.П.}}(i) = & (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_4^i \delta_7 P_{\text{АК}_i} (1 - R_{\text{АК}_i}) (1 - \Phi_{\text{АП}}^*) + (1 - \delta_1^i) \times \\
& \times \delta_2^i \delta_5^i \delta_7 P_{\text{АК}_i} (1 - R_{\text{АК}_i}) \Phi_{\text{АК}}^* (1 - \Phi_{\text{АП}}^*) .
\end{aligned} \tag{5}$$

Преобразуем выражение (5) к удобному для использования виду

$$P_{\text{Л.П.}}(i) = (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_7 P_{\text{АК}_i} (1 - R_{\text{АК}_i}) (1 - \Phi_{\text{АП}}^*) (\delta_4^i + \delta_5^i \Phi_{\text{АК}}^*) . \tag{6}$$

Просуммируем все ветви графа, ведущие к событиям 8.5, 8.8, 8.11, 8.13, 8.16, 8.20, 8.29 и определим $P_{П.д.} (i)$

$$\begin{aligned}
 P_{П.д.} (i) = & P(2.1) P(3.1) P(4.2) P(5.3) P(6.3) P(8.5) + \\
 & + P(2.2) P(3.2) P(4.3) P(5.4) P(8.8) + P(2.2) \times \\
 & \times P(3.2) P(4.4) P(5.5) P(6.5) P(7.8) P(8.11) + \\
 & + P(2.2) P(3.2) P(4.4) P(5.5) P(6.6) P(8.13) + \quad (7) \\
 & + P(2.2) P(3.2) P(4.4) P(5.5) P(6.7) P(7.10) \times \\
 & \times P(8.16) + P(2.2) P(3.2) P(4.4) P(5.5) \times \\
 & \times P(6.7) P(7.12) P(8.16) + P(2.2) P(3.2) \times \\
 & \times P(4.4) P(5.6) P(6.9) P(8.20) + P(2.2) \times \\
 & \times P(3.3) P(4.8) P(5.12) P(6.12) P(8.29),
 \end{aligned}$$

где $P_{П.д.} (i)$ - вероятность того, что в результате реализации i -ой ЭС в С остались только элементы АК.

Подставляя соответствующие значения вероятностей в выражение (7), получим

$$\begin{aligned}
 P_{ПД} (i) = & \delta_1^i \delta_3^i \delta_7 P_{АПi} R_{АПi} + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_7 (1 - P_{АКi}) + (1 - \delta_1^i) \times \\
 & \times \delta_2^i \delta_4^i \delta_7 P_{АКi} (1 - R_{АКi}) \Phi_{АП}^* + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_3^i \delta_7 P_{АКi} \times \\
 & \times (1 - R_{АКi}) + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_5^i \delta_7 P_{АКi} (1 - R_{АКi}) \Phi_{АП}^* \times \\
 & \times (1 - \Phi_{АК}^*) + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_5^i \delta_7 P_{АКi} (1 - R_{АКi}) \Phi_{АК}^* \Phi_{АП}^* + \\
 & + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_3^i \delta_7 P_{АКi} R_{АКi} + (1 - \delta_1^i) (1 - \delta_2^i) \delta_3^i \delta_7 \times \\
 & \times P_{АПi} P_{АКi} R_{АКi} R_{АПi} . \quad (8)
 \end{aligned}$$

После соответствующих преобразований выражение (8) примет вид

$$P_{III}(i) = \delta_1^i \delta_3^i \delta_7 P_{АПi} R_{АПi} + (1 - \delta_1^i) \delta_7 (\delta_2^i (1 - P_{AKi} ((1 - \delta_3^i) - \Phi_{АП}^* \times (1 - R_{AKi}) (\delta_4^i + \delta_5^i))) + (1 - \delta_2^i) \delta_3^i P_{АПi} P_{AKi} R_{AKi} R_{АПi}) \quad (9)$$

Просуммируем все ветви графа, ведущие к событиям 8.4, 8.6, 8.7, 8.9, 8.12, 8.15, 8.19, 8.21, 8.22, 8.23, 8.24, 8.25, 8.28, 8.30 и определим $P_{III}(i)$

$$\begin{aligned}
P_{III}(i) = & P(2.1) P(3.1) P(4.2) P(5.3) P(6.3) P(8.4) + \\
& + P(2.1) P(3.1) P(4.2) P(5.3) P(6.4) P(8.6) + \\
& + P(2.2) P(3.2) P(4.3) P(5.4) P(8.7) + P(2.2) \times \\
& \times P(3.2) P(4.4) P(5.5) P(6.5) P(7.7) P(8.9) + \\
& + P(2.2) P(3.2) P(4.4) P(5.5) P(6.5) P(7.8) \times \\
& \times P(8.9) + P(2.2) P(3.2) P(4.4) P(5.5) P(6.6) \times \\
& \times P(8.12) + P(2.2) P(3.2) P(4.4) P(5.5) P(6.7) \times \\
& \times P(7.10) P(8.15) + P(2.2) P(3.2) P(4.4) P(5.5) \times \quad (10) \\
& \times P(6.7) P(7.11) P(8.15) + P(2.2) P(3.2) P(4.4) \times \\
& \times P(5.5) P(6.7) P(7.12) P(8.15) + P(2.2) P(3.2) \times \\
& \times P(4.4) P(5.6) P(6.9) P(8.19) + P(2.2) P(3.2) \times \\
& \times P(4.4) P(5.6) P(6.10) P(8.21) + P(2.2) P(3.3) \times \\
& \times P(4.5) P(5.7) P(8.22) + P(2.2) P(3.3) P(4.6) \times \\
& \times P(5.8) P(8.23) + P(2.2) P(3.3) P(4.8) P(5.9) \times \\
& \times P(8.24) + P(2.2) P(3.3) P(4.8) P(5.10) P(8.25) + \\
& + P(2.2) P(3.3) P(4.8) P(5.12) P(6.12) P(8.28) + \\
& + P(2.2) P(3.3) P(4.8) P(5.12) P(6.13) P(8.30) ,
\end{aligned}$$

где $P_{III}(i)$ - вероятность того, что в результате реализации i -ой ЭС, в С будут как элементы АК, так и АП.

Подставляя в выражение (10) значения соответствующих вероятностей, получим

$$\begin{aligned}
P_{III}(i) = & \delta_1^i \delta_3^i \delta_6 P_{АПi} R_{АПi} + \delta_1^i \delta_5^i P_{АПi} R_{АПi} + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_6 \times \\
& \times (1 - P_{АКi}) + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_4^i \delta_6 P_{АКi} (1 - R_{АКi}) (1 - \Phi_{АП}^*) + \\
& + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_4^i \delta_6 P_{АКi} (1 - R_{АКi}) \Phi_{АП}^* + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_3^i \times \\
& \times \delta_6 P_{АКi} (1 - R_{АКi}) + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_5^i \delta_6 P_{АКi} (1 - R_{АКi}) \times \\
& \times \Phi_{АП}^* (1 - \Phi_{АК}^*) + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_5^i \delta_6 P_{АКi} (1 - R_{АКi}) \Phi_{АК}^* \times \\
& \times (1 - \Phi_{АП}^*) + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_5^i \delta_6 P_{АКi} (1 - R_{АКi}) \Phi_{АК}^* \Phi_{АП}^* + \\
& + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_3^i \delta_6 P_{АКi} R_{АКi} + (1 - \delta_1^i) \delta_2^i \delta_5^i P_{АКi} R_{АКi} + \quad (11) \\
& + (1 - \delta_1^i) (1 - \delta_2^i) P_{АПi} (1 - P_{АКi}) + (1 - \delta_1^i) (1 - \delta_2^i) P_{АКi} \times \\
& \times (1 - P_{АПi}) + (1 - \delta_1^i) (1 - \delta_2^i) P_{АПi} P_{АКi} R_{АПi} (1 - R_{АКi}) + \\
& + (1 - \delta_1^i) (1 - \delta_2^i) P_{АПi} P_{АКi} R_{АКi} (1 - R_{АПi}) + (1 - \delta_1^i) \times \\
& \times (1 - \delta_2^i) \delta_3^i \delta_6 P_{АПi} P_{АКi} R_{АКi} R_{АПi} + (1 - \delta_1^i) (1 - \delta_2^i) \delta_5^i \times \\
& \times P_{АПi} P_{АКi} R_{АКi} R_{АПi} \quad .
\end{aligned}$$

После соответствующих преобразований выражение (11) примет вид

$$\begin{aligned}
P_{III}(i) = & \delta_1^i (\delta_3^i \delta_6 + \delta_5^i) P_{АПi} R_{АПi} + (1 - \delta_1^i) (\delta_2^i (\delta_6 ((1 - P_{АКi}) + \\
& + P_{АКi} (1 - R_{АКi})) (\delta_4^i + \delta_3^i + \delta_5^i (\Phi_{АП}^* (1 - \Phi_{АК}^*) + \Phi_{АК}^*))) + \\
& + P_{АКi} R_{АКi} (\delta_3^i \delta_6 + \delta_5^i)) + (1 - \delta_1^i) (P_{АПi} (1 - P_{АКi}) + P_{АКi} \times \quad (12) \\
& \times ((1 - P_{АПi}) + P_{АПi} (R_{АПi} (1 - R_{АКi}) + R_{АКi} (1 - R_{АПi}) + \\
& + R_{АПi} (\delta_3^i \delta_6 + \delta_5^i)))))) \quad .
\end{aligned}$$

Выводы

Граф процесса локализации отказа БКПА при ее самоконтроле является политохомическим деревом решений, вершины отображают: функциональный

состав элементарной самопроверки, комбинаторных подмножеств элементов контролируемой области элементов, гипотезы о состоянии контролируемых областей элементов, результаты реализации элементарных самопроверок, ПОЭ-КОЭ, о состоянии ПОЭ-КОЭ и принимаемые решения, а дуги - вероятности перехода состояний и событий. Такая структура графа позволяет решать задачи, связанные с прогнозированием принятия соответствующих решений по выбираемой очередной ЭС при локализации отказа БКПА.

Полученные в общем виде аналитические выражения для соответствующих решений учитывают не только состояния функциональных составляющих: БКПА, ССК, но и ПОЭ, КОЭ, а также процесс изменения ПОЭ. Это позволяет решить задачу определения оптимальной глубины локализации отказов БКПА с учетом пересечения ЭС.

Библиографический список

1. Аменитский М.В. Анализ потенциальных угроз системы управления беспилотных летательных аппаратов средних и тяжелых классов // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81066>
2. Hayes R., Mumm E., Gotthelf K. Electrical noise performance of gold-on-gold slip rings // 43th Aerospace Mechanisms Symposium, Santa Clara, California, USA. May 4-6, 2016. С. 345 – 357.
3. Hamid Alturbeh. Collusion avoidance systems for UAS operating in civil airspace, PhD Thesis, Cranfield University, School of Engineering, 2014, 210 p.

4. Podins K., Stinissen J., Maybaum M., et al. The Vulnerability of UAVs to Cyber Attacks – An Approach to the Risk Assessment // 5th International Conference on Cyber Conflict, NATO CCD COE Publications, Tallinn, 2013, 515 p.
5. Kuznetsov V. and Kechiev L. Charged board model ESD simulation for PCB mounted MOS transistors // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, vol. 57, no. 5, pp. 947 – 954.
6. Chemoshencev S.F., Gaynutdinov R.R. Modeling the external electromagnetic influences on the complex electronic equipment // Proceedings of the XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), May 19–21, 2015, Saint-Petersburg, Russia, pp. 90 - 92.
7. Global positioning systems directorate systems engineering & integration. Interface specification IS-GPS-200, 2013, 213 p.
8. MD-88/90 Operations Manual Volume 2. Copyright 2014 Delta Air Lines, Inc. 744 p.
9. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. - М.: Изд-во МАИ, 2014. - 172 с.
10. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Study of lightning strike impact on unmanned aerial vehicle // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016), Erlagol, 2016, pp. 428 - 432.
11. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Immunity research of the electronic systems elements at the influence of intentional ultrashort electromagnetic pulses // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016), Erlagol, 2016, pp. 214 - 218.

12. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость элементов и устройств бортовых систем летательных аппаратов при воздействии электростатических разрядов: Дисс. ... докт. техн. наук: – М., МАИ, 2002. 293 с.
13. Кириллов Ю.В. Электромагнитная совместимость летательных аппаратов. – М.: Изд-во МАИ, 2012. – 164 с.
14. Чермошенцев С.Ф. Информационные технологии электромагнитной совместимости электронных средств. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2000.- 152 с.
15. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения. ГОСТ 19919-74. - М.: Издательство стандартов, 1975. -14 с.
16. Морозов Д.В. Бинарная иерархическая модель системы управления беспилотного летательного аппарата // IV научно-техническая конференция «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами». Тезисы докладов. – М.: МОКБ «Марс», 2017. – С. 132 - 133.
17. Морозов Д.В. Повышение надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. № 3. С. 112 - 118.
18. Заведеев А.И., Ковалев А.Ю. Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата // Труды МАИ. 2012. № 54. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29688>

19. Заведеев А.И. Построение системы управления ориентацией космического аппарата повышенной отказоустойчивости // Труды МАИ. 2012. № 54. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29687>
20. Сапогов В.А., Анисимов К.С., Новожилов А.В. Отказобезопасная вычислительная система для комплексных систем управления полетом летательных аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: http://trudymai.ru/published.php?ID=25498&PAGEN_2=2
21. Avizienis A., et al. The STAR (Self-Testing-And-Repairing) computer: An investigation of the theory and practice of faulttolerant computer desing // IEEE Transactions Computers, 1971, vol. 20, no. 11, pp. 1312 – 1321.
22. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Высшая школа, 1999. - 576 с.