

Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре

Денис В. Морозов, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ – КАИ), Казань, Россия

Сергей Ф. Чермошенцев, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ – КАИ), Институт компьютерных технологий и защиты информации, Казань, Россия



Денис В. Морозов



Сергей Ф. Чермошенцев

Резюме. Целью данной статьи является разработка методики повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата (СУ БЛА) при электромагнитном воздействии в полете и возникновении отказа в функциональной части бортовой контрольно-проверочной аппаратуры (БКПА). Эта цель достигается определением отказавшего функционального элемента, идентификацией функциональной части СУ БЛА и принятием решения на включение гибкого алгоритма работы. В существующих и в разрабатываемых перспективных образцах СУ БЛА принимаются бинарные модели ее безотказности, т.е. различают два состояния: работоспособное и неработоспособное. Поэтому любой возникший отказ на траектории полета классифицируется как отказ всей СУ БЛА, без учета выполняемых на данном этапе задач. Если исходить из представления СУ как многофункциональной системы, то становится очевидным тот факт, что отказ не любого функционального элемента СУ БЛА ведет к прекращению полета. **Методы.** При решении поставленной задачи использовалась диагностическая модель СУ, представленная виде бинарных отношений управляющих воздействий и комбинаторных подмножеств функциональных элементов, методика определения риска потерь в решении задач повышения надежности функционирования СУ БЛА в полете, теория принятия решений и комбинированного метода ветвей и границ. В качестве критерия эффективности используется вероятность выполнения задачи. Данный критерий применим в том случае, когда изменение характеристик СУ БЛА приводит не к полному, а к частичному снижению эффективности его функционирования. **Результаты.** Целью самоконтроля БКПА является локализация отказа с глубиной, позволяющей определить возможность выполнения ею основных операций с вероятностью не ниже требуемой, которая определяется заказчиком, и допустимый состав элементарных проверок (ЭП) в этом случае. По текущим результатам проведения элементарных самопроверок (ЭС) может приниматься решение из следующего множества решений: прекратить проверки и забраковать БКПА; продолжить локализацию; прекратить локализацию отказа и продолжить выполнение СУ БЛА программы полета по измененному алгоритму. На каждом шаге локализации отказа в БКПА по результатам проведения ЭС проводится анализ области покрываемой проверки (ОПП) и подозреваемой на отказ области элементов (ПОЭ), в том числе проверка ОПП на достаточность покрытия ПОЭ, на основании которого принимаются соответствующие решения. В этом случае образуются области: область наблюдаемых данных (процессы изменения областей ОПП, ПОЭ), при попадании в которую принимаются решения продолжать проверки, и область, при попадании в которую принимаются заключительные решения прекратить проверки. Принятие решений на продолжение локализации отказа приводит к выбору очередной ЭС, что сопровождается рисками потерь. В качестве риска потерь принимается вероятность ложного забракования БКПА по выбираемым ЭС из ОПП. Момент прекращения проведения самоконтроля БКПА зависит не только от совокупности решений, но и от последовательности их выполнения. Таким образом, рассматриваемая задача сводится к построению оптимальной стратегии проведения ЭС, минимизирующей вероятность ложного забракования. Идея комбинированного метода ветвей и границ (МВГ) при построении оптимального алгоритма самоконтроля БКПА состоит в последовательном выборе на каждом шаге процесса реализации ЭС из подмножества проверок по минимальному риску очередной ЭС, до получения одноэлементного подмножества и (или) принятия соответствующего решения. **Выводы.** Разработанная методика позволяет продолжить выполнение конечных целевых задач (конечной целевой задачи) СУ БЛА в полете при возникновении отказов в БКПА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система управления, самоконтроль, комбинаторные подмножества элементов, подозреваемая на отказ область элементов, бинарная диагностическая модель, вероятность ложного забракования, комбинированный метод ветвей и границ, риск потерь.

Формат цитирования: Морозов Д.В., Чермошенцев С.Ф. Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре // Надежность. 2019. №1. С. 30-35. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-1-30-35

Введение

Современный беспилотный летательный аппарат (БЛА) по уровню технического оснащения является сложной технической системой. Введение управляющей цифровой вычислительной машины (ЦВМ) в систему управления (СУ) позволило резко расширить выполняемые функции и задачи БЛА. На борт были переданы не только функции контроля и диагностического самоконтроля, но и полностью перевести полет БЛА в автоматический режим. Успех выполнения стоящих перед БЛА задач зависит от безотказной работы всех бортовых систем. БЛА часто функционирует в сложной электромагнитной обстановке, вызванной наличием множества специфических внешних и внутренних факторов [1, 2, 3]. Это, как следствие, привело к увеличению отказов в СУ БЛА. СУ БЛА [4, 5] состоит из бортовой контрольно-проверочной аппаратуры (БКПА), системы ее самоконтроля (ССК) и бортовой аппаратуры выполнения задач целевого применения (БА). В существующих и в разрабатываемых перспективных образцах СУ БЛА принимаются бинарные модели ее безотказности, т.е. различают два состояния [4, 5]: работоспособное и неработоспособное. Поэтому любой возникший отказ на траектории полета классифицируется как отказ всей СУ БЛА, без учета выполняемых на данном этапе задач. В этом случае прекращается выполнение задач и БЛА возвращается на стартовую позицию (аэродром) с целью поиска отказавшего элемента и его замены. При этом замена производится или уровне отказавшего блока или типового элемента замены.

Однако если исходить из представления СУ как многофункциональной системы, то становится очевидным тот факт, что отказ не любого функционального элемента СУ БЛА [6, 7, 8] ведет к невозможности выполнения задач целевого применения. Таким образом, неодинаковая значимость отказов различных функциональных элементов СУ БЛА на конечную задачу целевого применения позволяет, используя изменение алгоритма функционирования СУ, повысить эффективность применения БЛА в полете. Изменение программы полета можно осуществлять по принципу исключения поврежденных областей с последующим продолжением работы с оставшимися функциями. 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 (АП) БЛА [7, 9].

Целью данной статьи является разработка методики повышения надежности функционирования СУ БЛА при электромагнитном воздействии в полете и возникновении отказа в функциональной части БКПА. Эта цель достигается определением отказавшего функционального элемента, идентификацией функциональной части БКПА, возможностью выполнения конечных целевых задач (конечной целевой задачи) СУ БЛА и принятием решения на включение гибкого алгоритма работы.

Определения, используемые в методике

В [10] предложена бинарная иерархическая модель (БИМ) СУ БЛА. Она представляет собой разбиение СУ на локальные функциональные части, что вызвано необходимостью оценки их влияния на конечный результат процесса выполнения задач целевого применения СУ БЛА в полете и возможностью осуществления процедуры изменения алгоритма ее функционирования. Каждая операция реализуется своей совокупностью элементов, которые в общем случае пересекаются между собой [9, 11]. 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 проверкой (ЭП) называется совокупность ЭО, необходимых и достаточных для контроля отдельного параметра (признака) объекта контроля.

Определение 3. Элементарной самопроверкой (ЭС) называется совокупность ЭО, необходимых и достаточных для контроля отдельного параметра (признака) БКПА при ее самоконтроле.

Определение 4. Контролируемая область элементов (КОЭ – \mathfrak{A}_i) – совокупность (подмножество) КПЭ БКПА, покрываемая i -ой ЭП (ЭС)

$$\{b_1, \dots, b_i\} \in \mathfrak{A}_i.$$

Определение 5. Подозреваемая на отказ область элементов (ПОЭ – \mathfrak{B}) – это область КПЭ(a), образованная

в результате пересечения $\bar{\mathcal{U}}_i$ i -ой ЭС, в которой зафиксирован отказ с \mathcal{U}_j предыдущих ЭС

$$\{b_j\} \in \bar{\mathcal{U}}_i \cap \mathcal{U}_j \in \mathcal{C},$$

где $\bar{\mathcal{U}}_i$ – КОЭ i -ой ЭС, в которой зафиксирован отказ;

$\mathcal{U}_j, j = 1, i-1$ – 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 $\mathcal{U}_j = \emptyset$, т.е. ПОЭ совпадает с КОЭ i -ой ЭС.

Определение 6. ЭС (π_i) является существенной для \mathcal{C}_r , если одновременно $\mathcal{C}_i \cap \mathcal{C}_r \neq \mathcal{C}_r$ и $\mathcal{C}_i \cup \mathcal{C}_r \neq \emptyset$.

Определение 7. 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.

Постановка задачи

Имеется СУ БЛА, состоящая из БКПА, БА и ССК. Составляющие этой системы представлены бинарной диагностической моделью (БДМ) [10]. Для каждого функционального элемента БДМ известны интенсивности отказов, представленные вектор-строками.

С помощью ЭП (ЭС) контролируется работоспособность всех КПЭ БА СУ (КПЭ БКПА), соответственно, ЭП (ЭС) может иметь два определенных исхода: «норма» и «не норма». Безотказность СУ БЛА должна быть обеспечена с требуемой вероятностью P^* . Известно время проведения последнего контроля БА СУ и самоконтроля БКПА. ЭП являются пересекающимися по элементам БКПА, причем каждой ЭП ставится в соответствие ЭС при самоконтроле. В БКПА имеется отказ, принадлежащий одному КПЭ, который не позволяет выполнить часть ЭП (совокупность ЭП) БА СУ.

Целью самоконтроля БКПА является локализация отказа с глубиной, позволяющей определить возможность выполнения ею основных операций с вероятностью не ниже P^* и допустимый состав ЭП в этом случае.

При выполнении π_γ (γ -ой ЭП) получен результат «не норма». В этом случае все множество Π ЭП (ЭС) делится на два непересекающихся подмножества (если $\gamma \neq 1$ и $\gamma \neq M$):

$\Pi_1 = \{\pi_1, \dots, \pi_\gamma\}$ – подмножество реализованных ЭП (ЭС);

$\Pi_2 = \{\pi_{\gamma+1}, \dots, \pi_M\}$ – подмножество нереализованных ЭП (ЭС).

Определены: ПОЭ (\mathcal{C}), в состав которой входит $\{\bar{b}_j\}$ КПЭ КПА и ОПП (\mathcal{S}) – область ЭП (ЭС), покрывающая ПОЭ. Причем $\mathcal{S} \subseteq \Pi_2$ и является достаточной для локализации отказа. ЭП (ЭС), составляющие \mathcal{S} по функциональному назначению могут быть основными и вспомогательными.

По текущим результатам проведения ЭС может приниматься решение из следующего множества решений \mathcal{D} :

– решение 1 – прекратить проверки и забраковать БКПА;

– решение 2 – продолжить локализацию отказа;

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

На конечной стадии самоконтроля БКПА второе решение вырождается в первое или в третье. Поэтому множество \mathcal{D} содержит два основных элемента: d_n – решение о продолжении локализации отказа и d_3 – решение о завершении локализации отказа. Решения второе и третье определяют глубину самоконтроля БКПА.

На каждом шаге t_i локализации отказа в БКПА по результатам проведения ЭС производится анализ ОПП и ПОЭ, в том числе проверка ОПП на достаточность покрытия ПОЭ ($\mathcal{C} \subseteq \mathcal{S}$), на основании которого принимаются соответствующие решения. В этом случае образуются области $\mathcal{G}_n^0, \mathcal{G}_\psi: \mathcal{G}_n^0(t_i)$ – область наблюдаемых данных (процессы изменения областей \mathcal{C}, \mathcal{S}), при попадании в которые принимаются решения

$$d_n = (d_n^{11}, d_n^{10}) \text{ и } d_n^0,$$

где d_n^{11} – решение продолжить локализацию отказа, т.к. в ПОЭ имеются $\{b_j\} \in \text{АК, АП БКПА}$;

d_n^{10} – решение продолжить локализацию отказа, т.к. в ПОЭ $\{b_j\} \in \text{АК БКПА}$, при условии $P_{B3} < P^*$;

P_{B3} – в качестве критерия оценки эффективности СУ БЛА используется критерий вероятности выполнения задачи, который применим в том случае, когда изменение характеристик объекта приводит не к полному, а частичному снижению эффективности его функционирования. Под этим показателем [7] понимаем апостериорную вероятность отсутствия отказов в аппаратуре СУ, необходимой и достаточной для осуществления успешного выполнения задач целевого применения СУ БЛА.

d_n^{0i} – решение о том, что следующей будет реализована i -ая ЭС;

$\mathcal{G}_\psi(t_i)$ – область, при попадании в которую принимаются заключительные решения

$$d_3 = (d_3^{01}, d_3^{10}),$$

где d_3^{01} – решение прекратить проверки и забраковать БКПА, т.к. в ПОЭ имеются только $\{b_j\} \in \text{АП БКПА}$;

d_3^{10} – решение прекратить локализацию и допустить БКПА к продолжению выполнения конечных задач (конечной задачи) с измененной программой функционирования СУ, т.к. в ПОЭ $\{b_j\} \in \text{АК}$ и $P_{B3} \geq P^*$.

Решение $d(t_i) = \delta_i(\mathcal{C}^i, \mathcal{S}^i)$, отвечающее общему последовательному правилу $\delta = \{\delta_i(\mathcal{C}^i, \mathcal{S}^i), \mathcal{C}, \mathcal{S} \in \mathcal{G}(t_i), i \geq 0\}$ с планированием наблюдений, имеет вид

$$\delta_i(\mathcal{C}^i, \mathcal{S}^i) = \begin{cases} d_n^0 \text{ при } \mathcal{C}^i, \mathcal{S}^i \in \mathcal{G}_n^0(t_i), i \geq 0, \\ d_\psi \text{ при } \mathcal{C}^i, \mathcal{S}^i \in \mathcal{G}_\psi(t_i), i \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Принятие решений на продолжение локализации отказа приводит к выбору очередной ЭС, что сопровождается рисками потерь [11, 12]. В качестве риска потерь принимается вероятность ложного забракования БКПА по выбираемым ЭС из ОПП, которая определяется по формуле

$$P_{Л.З}^*(i) = P_{Л.З}(i) + P_{ПП}(i) \hat{P}_{Л.З}^{\max}(M-i), \quad (2)$$

где $\hat{P}_{Л.З}^{\max}(M-i)$ – оценка вероятности ложного забракования за оставшиеся ЭС;

$P_{ПП}(i)$ – вероятность того, что в результате реализации i -ой ЭС, в \mathcal{C} будут как элементы АК, так и АП.

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

Момент прекращения проведения самоконтроля БКПА зависит не только от совокупности решений \mathcal{D} , но и от последовательности их выполнения

$$\tau(\delta_i) = \inf \left\{ \tilde{\gamma}(\delta_i) : d(t_i) \in \mathcal{D}_n \right\}$$

и является случайной величиной.

Таким образом, рассматриваемая задача сводится к построению оптимальной стратегии проведения ЭС, минимизирующей вероятность ложного забракования

$$\tilde{\gamma}(\delta) = \min P_{Л.З}(i) \text{ при } P_{БЗ} \geq P^*. \quad (3)$$

Описание метода решения

Считаем, что достоверно известен факт существования в БКПА одного отказавшего КПЭ. На основании свойств бинарной диагностической модели БКПА производится формирование исходных ПОЭ и ОПП. По полученным результатам производится их анализ. Для ОПП он заключается в определении функционального состава ЭС, которые могут быть основными и вспомогательными, а для ПОЭ – приводит к соответствующему решению d_n или d_s . Если результаты анализа оказались в области $\mathcal{G}_{П}^{\phi}$, то производится выбор очередной ЭС

из состава исходной ОПП. Применение i -ой ЭС для локализации отказа в БКПА можно рассматривать как разбиение множества ПОЭ на два подмножества \mathcal{C}_j и \mathcal{C}_i , причем по результату реализации π_i i -ой ЭС однозначно определяется принадлежность отказавшего КПЭ одному из этих подмножеств: подмножеству \mathcal{C}_j при результате «норма» и подмножеству \mathcal{C}_i при результате «не норма». Для дальнейшей локализации отказа в БКПА могут применяться, очевидно, только ЭС, существенные для текущей ПОЭ. Поэтому в процессе выбора i -ой ЭС осуществляется уточнение ОПП, где должны остаться после реализации этой ЭС только существенные. Выбор очередной ЭС производится на основании прогнозирования риска потерь от ее реализации. В качестве риска потерь принимается вероятность ложного забракования БКПА по i -ой ЭС [9, 11, 12]. Расчет $P_{Л.З}^*(i)$ производится на основании методики определения риска потерь в решении задач повышения надежности функционирования СУ БЛА в полете [9, 11] по формуле (2). Реализация очередной ЭС при самоконтроле БКПА может привести к вероятности ее ложного забракования. Поэтому производится оценка этой вероятности для всех ЭС, составляющих ОПП данного шага локализации. В формуле (2) оценку $\hat{P}_{Л.З}^{\max}(M-i)$ можно произвести через вероятность отказа средств самоконтроля функциональной части АП БКПА по остальным ЭС из ОПП. В этом случае формула (2) имеет вид

$$P_{Л.З}^*(i) = P_{Л.З}(i) + P_{ПП}(i) Q_{АП}(M-i), \quad (4)$$

где $Q_{АП}(M-i)$ – вероятность отказа средств самоконтроля функциональной части АП БКПА.

Расчет составляющих выражения (4) производится на основании методики определения риска потерь в решении

Таблица 1 – Составляющие модели процесса локализации отказа КПА при ее самоконтроле

Номера вершин графа	Классификация ЭС			Гипотеза результ. ЭС		ПОЭ-КОЭ			Решение		$P_{Л.З.}(i)$	$P_{ПП}(i)$	$Q_{АП}(\mathcal{M}-i)$	$P_{Л.З.}^*(i)$
	δ_1	δ_2	$1-\delta_2$	Н	\overline{H}	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6	δ_7				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8.4	1	0	1	1	0	1	-	0	1	0	0	$P_{АП_i} R_{АП_i}$	0	0
8.5	1	0	1	1	0	1	-	0	0	1	0	0	0	0
8.6	1	0	1	1	0	0	-	1	1	0	0	$P_{АП_i} R_{АП_i}$	$1-e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{АП_i} R_{АП_i} \times$ $\times Q_{АП}(\mathcal{M}-i)$
8.1	1	0	1	0	1	-	-	-	0	0	0	0	0	0
8.2'	1	0	1	0	1	1	-	0	0	0	$P_{АП_i}(1-R_{АП_i})$	0	0	$P_{АП_i}(1-R_{АП_i})$
8.2''	1	0	1	0	1	0	-	1	0	0	$P_{АП_i}(1-R_{АП_i}) \times$ $\times \Phi_{АП}^*$	0	$1-e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{АП_i}(1-R_{АП_i}) \times$ $\times \Phi_{АП}^*$
8.7	0	1	0	0	1	-	-	-	1	0	0	$1-P_{АК_i}$	0	0
8.8	0	1	0	0	1	-	-	-	0	1	0	0	0	0
8.12	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	$P_{АК_i}(1-R_{АК_i})$	0	0
8.13	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
8.15	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	$P_{АК_i}(1-R_{АК_i}) \times$ $\times (\Phi_{АП}^*(1-\Phi_{АК}^*)$ $+ \Phi_{АК}^*)$	0	0
8.16	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
8.9	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	$P_{АК_i}(1-R_{АК_i})$	0	0
8.10	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	$1-e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	0
8.19	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	$P_{АК_i} R_{АК_i}$	0	0
8.20	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0

Окончание таблицы 1

Номера вершин графа	Классификация ЭС			Гипотеза результ. ЭС		ПОЭ-КОЭ			Решение		$P_{ЛЗ.}(i)$	$P_{ПП}(i)$	$Q_{АП}(\mathcal{M}-i)$	$P_{ЛЗ.}^*(i)$
	δ_1	δ_2	$1-\delta_2$	H	\bar{H}	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6	δ_7				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8.21	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	$P_{AK_i} R_{AK_i}$	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{AK_i} R_{AK_i} \Phi_{АП}^* \times Q_{АП}(\mathcal{M}-i)$
8.18	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	$P_{AK_i} R_{AK_i} \Phi_{АП}^*$	0	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{AK_i} R_{AK_i} \Phi_{АП}^*$
8.22- 8.25	0	0	1	0	1	-	-	-	1	0	0	$P_{АП_i} + P_{AK_i} - 2P_{АП,AK_i} + P_{АП,AK_i} \times (1 - R_{АП_i})$	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$(P_{АП_i} + P_{AK_i} - 2P_{АП,AK_i} + P_{АП,AK_i} \times (1 - R_{АП_i})) \times Q_{АП}(\mathcal{M}-i)$
8.28	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	$P_{АП,AK_i} \times R_{АП,AK_i}$	0	0
8.29	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
8.27	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	$P_{АП,AK_i} \times R_{АП,AK_i} \Phi_{АП}^*$		$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{АП,AK_i} \times R_{АП,AK_i} \Phi_{АП}^*$
8.30	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	$P_{АП,AK_i} \times R_{АП,AK_i}$	$1 - e^{-\sum \lambda_{АП} t}$	$P_{АП,AK_i} \times R_{АП,AK_i} \times Q_{АП}(\mathcal{M}-i) \times \Phi_{АП}^*$

задач повышения надежности функционирования СУ БЛА в полете [9, 11] и представлен в таблице 1. Непосредственно сам выбор i -ой ЭС и построение оптимальной стратегии локализации отказа основывается на применении комбинированного метода ветвей и границ (МВГ). При использовании комбинированного МВГ, для построения оптимальных условных программ самоконтроля последовательное применение ЭС в процессе самоконтроля рассматривается как многошаговый процесс, а применение какой-либо ЭС на произвольном шаге – как разбиение множества допустимых на данном шаге состояний БКПА на две части, одной из которых принадлежит истинное состояние.

Идея комбинированного МВГ при построении оптимального алгоритма самоконтроля БКПА состоит

в последовательном выборе на каждом шаге процесса реализации ЭС из подмножества $\mathfrak{S} = \{\pi_{\gamma+1}, \dots, \pi_M\}$ по минимальной $P_{ЛЗ.}^*(i)$ очередной i -ой ЭС, до получения одноэлементного подмножества и (или) принятия соответствующего решения.

Этот процесс представлен графом на рисунке 1, где вершины соответствующего подмножества $\mathfrak{S} = \{\pi_{\gamma+1}, \dots, \pi_M\}$ – результаты реализаций ЭС, принимаемые по ним решения, а дуги – логические связи между вершинами. Результату реализации ЭС «норма» соответствуют решения 2 и 3, а «не норма» – решения 1 и 2. Рассмотрим левую ветвь графа.

Предположим, что на основании анализа исходной ОПП по минимальной $P_{ЛЗ.}^*(\gamma+1)$ выбрана $(\gamma+1)$ -ая

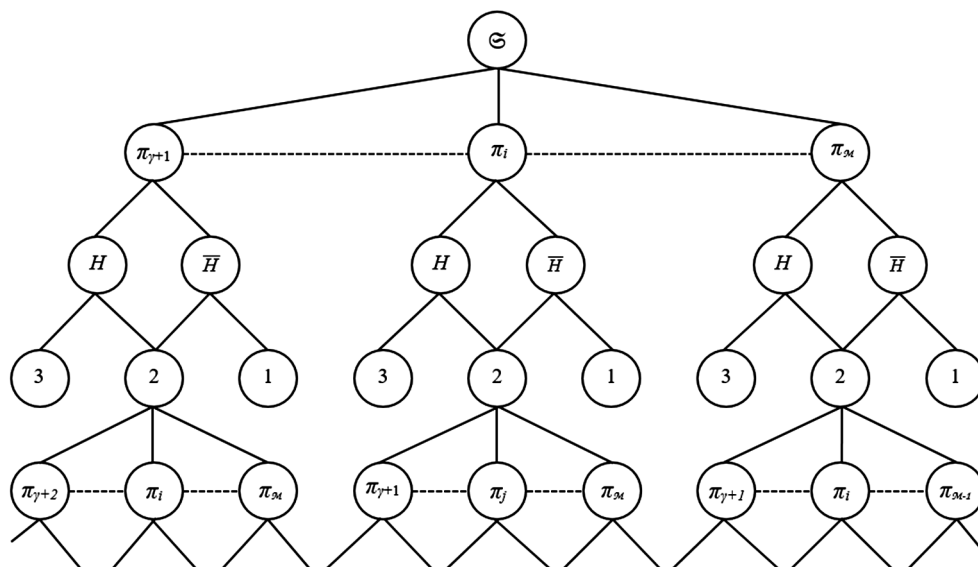


Рисунок 1– Граф процесса локализации отказа при самоконтроле БКПА

ЭС. В результате ее реализации может быть получен результат «норма» или «не норма», но принято решение d_n – продолжать локализацию отказа. На основании этого уточняется ОПП, которая в этом случае будет представлена $\mathfrak{S}^i = \{\pi_{\gamma+2}, \dots, \pi_M\}$. На t_1 шаге локализации отказа производится расчет $P_{л.3}^*(i)$, $i = \gamma + 2, M$, i -ой ЭС из состава \mathfrak{S}^i , и по минимальной $P_{л.3}^*(i)$ для реализации выбирается очередная ЭС. Процесс ветвления продолжается до принятия решения 1 или 3.

Заключение

Методика повышения надежности функционирования СУ БЛА позволяет определить стратегию применения БЛА в полете:

- а) если отказ принадлежит АП БКПА, то прекратить выполнение целевой задачи БЛА и вернуть его на СП;
- б) реализовать процедуру изменения алгоритма СУ БЛА, если отказ принадлежит АК БКПА, причем произвести локализацию с оптимальной глубиной при самоконтроле БКПА.

Принятие решений на продолжение локализации отказа приводит к выбору очередной ЭС, что сопровождается рисками потерь. В качестве риска потерь принимается вероятность ложного забракования БКПА по выбираемым ЭС из ОПП.

Предложен метод решения, основанный на реализации МВГ, идея применения которого состоит в последовательном выборе на каждом шаге процесса реализации ЭС из подмножества ОПП по минимальной $P_{л.3}^*(i)$ очередной ЭС, до получения одноэлементного подмножества и (или) принятия соответствующего решения.

Библиографический список

1. Чермошенцев, С.Ф. Информационные технологии электромагнитной совместимости электронных средств [Текст] / С.Ф. Чермошенцев. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2000. – 152 с.
2. Морозов, Д.В. Электромагнитная совместимость электронных систем беспилотных летательных аппаратов при воздействии электромагнитных волн [Текст] / Д.В. Морозов // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции (17 апреля 2014 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); В 4-х томах, Том 3., Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014. – С. 124–127.
3. Кирпичников, А.П. Особенности современной микроэлектроники и вопросы построения систем управления высокой надежности и безопасности [Текст] / А.П. Кирпичников, С.Н. Васильев // Надежность. – 2017. – Т.17, № 3. – С. 10–16.
4. ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения [Текст]. – Переиздат. Февраль, 1975. – 14 с.

5. Пашковский, Г.С. Задачи оптимального обнаружения и поиска отказов в РЭА [Текст] / Г.С. Пашковский: под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1981. – 280 с.

6. Шубинский, И.Б. Функциональная надежность информационных систем: Методы анализа [Текст] / И.Б. Шубинский. – М.: «Журнал Надежность», 2012. – 296 с.

7. Морозов, Д.В. Повышение надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете [Текст] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2017. – №3(89). – С. 112–118.

8. Черкесов, Г.Н., Недосекин, А.О., Виноградов, В.В. Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем [Текст] / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин, В.В. Виноградов // Надежность. – 2018. – Т.18, № 2. – С.17–24. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-2-17-24

9. Морозов, Д.В. Модель локализации отказов в аппаратуре системы управления беспилотного летательного аппарата при использовании гибкого алгоритма функционирования в полете [Текст] / Д.В. Морозов, С.Ф. Чермошенцев. // Труды МАИ. – 2018. – № 99. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91997>

10. Морозов, Д.В. Бинарная иерархическая модель системы управления беспилотного летательного аппарата [Текст] / Д.В. Морозов // Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами: тезисы докладов IV Всероссийской научно-технической конференции. (Москва, 31 октября – 2 ноября 2017 г.) – М.: МОКБ «Марс», 2017. – С. 132–133.

11. Морозов, Д.В. Методика определения потерь в решении задач повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете [Текст] / Д.В. Морозов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: ПГУ, 2018. – Т. 1. – С. 139–144.

12. Маковеев, О.Л. Оценка параметров безопасности и безотказности систем контроля и управления [Текст] / О.Л. Маковеев, С.Ю. Костюнин // Надежность. – 2017. – Т.17, № 1. – С.46–52.

Сведения об авторах

Денис В. Морозов – аспирант, «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ (КНИТУ – КАИ)», Институт компьютерных технологий и защиты информации, Казань, Россия, e-mail: i_am_morozov@mail.ru

Сергей Ф. Чермошенцев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Систем автоматизированного проектирования (САПР), «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ (КНИТУ – КАИ)», Институт компьютерных технологий и защиты информации, Казань, Россия

Поступила: 17.12.2018