

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВИАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА С ЦЕЛЬЮ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В. А. Никулин<sup>1</sup>, А. И. Лоскутов<sup>2</sup>, В. А. Клыков<sup>3</sup>, Е. А. Ряхова<sup>4</sup>, А. В. Столяров<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>1,2,3,4,5</sup> vka@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Неуклонный рост сложности бортовой аппаратуры беспилотных комплексов, а также объема выполняемых задач создает предпосылки к развитию систем диагностирования в данной области, с разработкой соответствующего специального математического и программно-алгоритмического обеспечения. Следовательно, возникает необходимость разработки методики формализации процесса функционирования беспилотных комплексов с целью создания специального математического обеспечения систем диагностирования. *Материалы и методы.* Для решения задачи технического диагностирования используется модифицированная временная сеть Петри и сформированный на ее основе статистический граф разметок. В работе предлагается использовать характеристику запрещенными графами для выделения разрешенных переходов при формализации различных режимов работы беспилотных авиационных комплексов. В качестве решения вопроса адекватности математической модели предлагается на начальном этапе формализации использовать инструмент синтаксически корректных параллельных граф-схем алгоритмов. *Результаты.* Предложенная методика построения математической модели процесса функционирования беспилотных авиационных комплексов позволила получить граф разметок с соответствующим пространством состояний. Характеристика запрещенными графами позволила выделить разрешенные переходы в данном графе исходя из основных режимов работы беспилотного авиационного комплекса. *Вывод.* Формализация процесса функционирования объекта контроля является ключевым элементом создания специального математического обеспечения систем автоматического диагностирования, позволяющим определять скрытые причинно-следственные связи, протекающие внутри любой сложной системы. Применение порождающих грамматик при построении синтаксически корректных параллельных граф-схем алгоритмов позволяет уйти от вопроса оценки адекватности синтезированной математической модели. Полученные результаты подтверждают возможность применения представленного подхода при разработке специального математического обеспечения бортовых систем диагностирования беспилотных авиационных комплексов.

**Ключевые слова:** математическая модель, алгоритм, беспилотный авиационный комплекс, сеть Петри, параллельная граф-схема алгоритма

**Для цитирования:** Никулин В. А., Лоскутов А. И., Клыков В. А., Е. А. Ряхова, Столяров А. В. Методика построения математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 31–40. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-3

## METHODOLOGY OF CONSTRUCTING A MATHEMATICAL MODEL OF THE OPERATION PROCESS OF AN UNMANNED AVIATION COMPLEX TO SOLVE THE PROBLEM OF TECHNICAL DIAGNOSIS

V.A. Nikulin<sup>1</sup>, A.I. Loskutov<sup>2</sup>, V.A. Klykov<sup>3</sup>, E.A. Ryakhova<sup>4</sup>, A.V. Stolyarov<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Military space Academy named after A. F. Mozhaisky, St.-Petersburg, Russia  
<sup>1,2,3,4,5</sup> vka@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The steady increase in the complexity of the on-board equipment of unmanned systems, as well as the volume of tasks performed, creates the preconditions for the development of diagnostic systems in this area, with the development of appropriate special mathematical and software-algorithmic support. Consequently,

there is a need to develop a methodology for formalizing the process of functioning of unmanned systems in order to create special software for diagnostic systems. *Materials and methods.* To solve the problem of technical diagnostics, a modified temporary Petri net and a statistical graph of markings formed on its basis are used. The paper proposes to use the characterization of forbidden graphs to highlight the allowed transitions in the formalization of various modes of operation of unmanned aircraft systems. As a solution to the question of the adequacy of the mathematical model, it is proposed to use the tool of syntactically correct parallel graph-schemes of algorithms at the initial stage of formalization. *Results.* The proposed method for constructing a mathematical model of the process of functioning of unmanned aircraft systems made it possible to obtain a markup graph with the corresponding state space. The characterization of forbidden graphs made it possible to single out the allowed transitions in this graph based on the main modes of operation of the unmanned aircraft complex. *Conclusion.* Formalization of the process of functioning of the controlled object is a key element in the creation of special mathematical support for automatic diagnostics systems, which makes it possible to determine the hidden cause-and-effect relationships that occur inside any complex system. The use of generative grammars in the construction of syntactically correct parallel graph-schemes of algorithms allows avoiding the question of assessing the adequacy of the synthesized mathematical model. The results obtained confirm the possibility of using the presented approach in the development of special software for on-board diagnostic systems for unmanned aircraft systems.

**Keywords:** mathematical model, algorithm, unmanned aircraft complex, Petri net, parallel graph-scheme of the algorithm

**For citation:** Nikulin V.A., Loskutov A.I., Klykov V.A., Ryakhova E.A., Stolyarov A.V. Methodology of constructing a mathematical model of the operation process of an unmanned aviation complex to solve the problem of technical diagnosis. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:31–40. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-3

## Введение

Автоматизация различных сфер деятельности человека инициировала процесс разработки и создания так называемых безэкипажных систем при решении сложных технических задач. Особую актуальность при разработке данных систем занимают вопросы создания беспилотных авиационных комплексов (БАК). Необходимо отметить, что в настоящее время создание БАК занимает одно из главных мест в производственных программах ведущих авиастроителей мира. Вместе с тем неуклонный рост сложности бортовой аппаратуры беспилотных комплексов, а также и объема выполняемых задач создает предпосылки к развитию систем диагностирования в данной области, с разработкой соответствующего специального математического и программно-алгоритмического обеспечения. Из литературы известно<sup>1</sup>, что специальное математическое обеспечение – это совокупность моделей, методов и алгоритмов, применяемых в автоматизированных системах. Исходя из этого можно сделать вывод, что создание математических моделей является первичным по отношению к разработке систем массового обслуживания (СМО) систем диагностирования БАК в целом. Необходимо отметить, что при разработке математического обеспечения систем диагностики (СД) важным элементом является формализация процесса функционирования непосредственно объекта диагностирования. Однако данный факт приводит к необходимости выбора математического инструмента (аппарата) для формального описания процессов, происходящих в объекте диагностирования (ОД). В свою очередь сущность задачи технического диагностирования и природа протекающих в ОД процессов могут значительно сузить выбор данных инструментов и представить ОД в виде абстрактной математической конструкции с соответствующим аппаратом формализации.

### **Постановка задачи разработки методики построения математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования**

Как было отмечено ранее, выбор математического аппарата зависит от решаемой задачи и процессов, происходящих в моделируемом объекте. Из литературы известно<sup>2</sup>, что задача технического диагностирования является триединой задачей, включающей в себя контроль технического

<sup>1</sup> ГОСТ 34.003-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1991. 16 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1990. 12 с.

состояния (ТС), поиск места и причины неисправности (диагностирование), а также прогноз ТС. Таким образом необходимо подобрать математический аппарат, позволяющий решить все три подзадачи с учетом природы процессов, протекающих в объекте моделирования. Другими словами, выбранный математический аппарат должен отвечать требованиям, предъявляемым к синтезируемой математической модели, необходимым для ее практической реализации.

Исходя из обозначенного, постановка задачи разработки методики построения математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования может быть представлена следующим образом.

Дано:

1. Вербальное описание моделируемой системы, позволяющее формализовать процесс функционирования беспилотного авиационного комплекса, в котором отражены наборы базисных множеств  $\Omega^{\text{БАК}}$  и отношения  $R^{\text{БАК}}$  над данными множествами. Необходимо отметить, что элементы множества  $\Omega^{\text{БАК}}$  и  $R^{\text{БАК}}$  будут с формальной точки зрения будут определять техническое состояние моделируемой системы при решении задач диагностирования в дальнейшем.

2. Совокупность требований  $\Sigma_{\text{треб}}$ , предъявляемых к синтезируемой математической модели БАК ( $\Xi_{\text{БАК}}$ ), необходимых для ее практической реализации.

3. Математический аппарат  $I$ , применяемый для формализации процесса функционирования БАК. На данном этапе определение конкретного аппарата является несущественным, в связи с этим под  $I$  будем понимать «инструмент» для формализации в общем.

Условно обозначим через пару элементов  $\langle \omega_f, r_g \rangle, f = \overline{1, m}, g = \overline{1, k}$  техническое состояние моделируемой системы.

Требуется: разработать методику  $M$  построения математической структуры  $\Xi_{\text{БАК}}$  с целью решения задачи технического диагностирования, включающей в себя элементы множества  $\Omega^{\text{БАК}}$  и также учитывающей отношения  $R^{\text{БАК}}$  над данными множествами.

Формально постановка задачи разработки методики синтеза математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования может быть представлена следующим образом: необходимо определить оператор  $F$ , применение которого к вербальному описанию моделируемой БРЭА обеспечивало бы получение математической модели  $\Xi_{\text{БАК}}$ , отвечающей требованиям  $\Sigma_{\text{треб}}$  и позволяющей найти единственное решение операторного наблюдения [1]:

$$F : \{ \Omega^{\text{БАК}}, R^{\text{БАК}}, \Sigma_{\text{треб}}, I \} \xrightarrow{M} \Xi_{\text{БАК}} \left| k(t_n, v_j) = y_i, y_i \in Y, Y \subset \Omega^{\text{БАК}}, \right. \quad (1)$$

где  $k(t_n, v_j) = y_i$  – операторное уравнение наблюдения, решение которого должно происходить относительно элемента  $v_j, j = \overline{1, n}$ , представляющего собой пару  $\langle \omega_f, r_g \rangle, f = \overline{1, m}, g = \overline{1, k}$ ;  $y_i \in Y$  – элементы множества  $Y$ , характеризующего выходные процессы и включенного в наборы базисных множеств  $Y \subset \Omega^{\text{БАК}}$ .

С точки зрения системного представления исследуемой в работе возможности разработки СМО СД БАК, удобно рассматривать обозначенную выше постановку задачи разработки методики в рамках всего подхода к достижению глобальной цели, а именно технического диагностирования БАК в целом. Как было отмечено ранее, на данном этапе выбор определенного математического аппарата является несущественным, так же, как и несущественным является выбор способа определения вида технического состояния (контроля) БАК и выбор способа поиска места и причины неисправности. Исходя из этого, обобщенная схема подхода к техническому диагностированию беспилотного авиационного комплекса может быть представлена следующим образом (рис. 1).

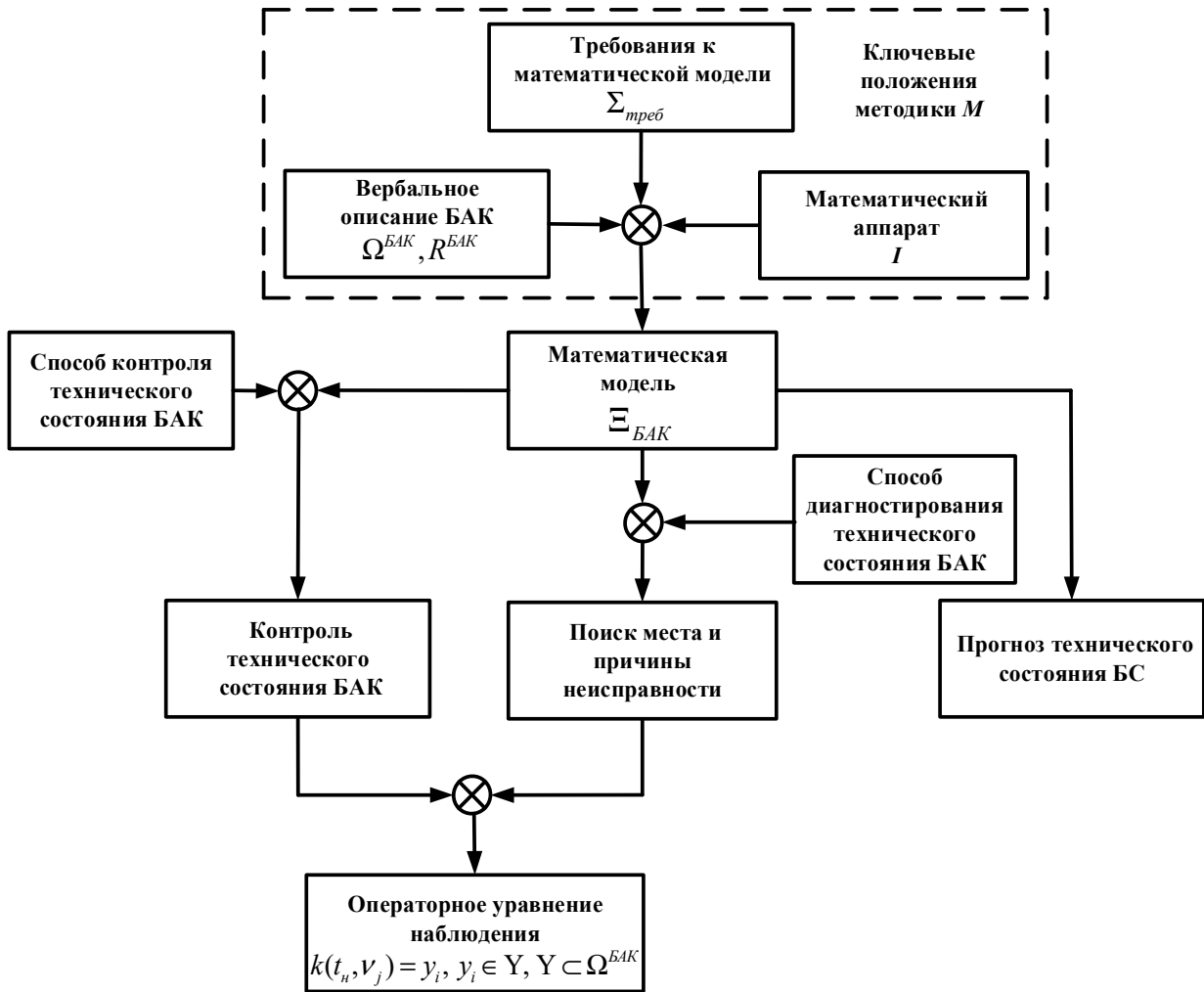


Рис. 1. Обобщенная схема технического диагностирования БАК

Как видно из рис. 1, одним из ключевых элементов при разработке методики построения математической структуры  $\Xi_{\text{БАК}}$  (определения оператора  $F$ ) является выбор математического аппарата для формализации процесса функционирования с целью решения задач технического диагностирования.

**Методика построения математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования**

В свою очередь известно [2], что для решения задачи технического диагностирования объект моделирования, с формальной точки зрения, удобно представлять в виде стационарной дискретной динамической системы. Класс математических аппаратов для формализации в данном случае остается довольно обширным, однако применительно для моделирования распределенных процессов наиболее предпочтительно с практической точки зрения использовать математический аппарат сетей Петри [3]. Данный математический аппарат является универсальным, на основе которого могут быть построены модельные конструкции, превосходящие по своим моделирующим возможностям различные дискретные модели с конечным или счетным множеством состояний. Однако необходимо отметить, что в общем случае формализация процесса функционирования любой системы на основе различных математических аппаратов подразумевает под собой ряд трудностей, одной из наиболее существенных проблем в данном случае является проблема адекватности синтезируемой математической модели. Для решения данной проблемы в работе предлагается применять аппарат синтаксически корректных параллельных граф-схем алгоритмов (ПГСА) на начальной формализации процесса функционирования БАК. Необходимо отметить, что синтаксическая корректность

алгоритма в данном случае обусловлена применением порождающих грамматик, описанных в литературе [4, 5] при построении ПГСА, что позволяет уйти от вопроса оценки адекватности синтезируемой математической модели. Язык синтаксически корректных ПГСА и процесс формального перехода на их основе к математическому аппарату сетей Петри подробно описан в литературе [6]. В общем виде ПГСА может быть представлена в виде следующей математической конструкции:

$$G = \langle V, E \rangle, \quad (2)$$

в котором:

1)  $V = \{u_i\}$  – конечное множество вершин, подразделяющееся на семь подмножеств:  $O, W, U, L, \Delta, H, K$ , причем  $O$  – подмножество операторных вершин, обозначающих действия над данными; остальные вершины – управляющие, среди них выделяются две:  $H$  – начало,  $K$  – конец;

2)  $E = \{e_i\}$  – конечное множество дуг, причем существование дуги  $e_i$  обозначает, что действие, соответствующее  $u_j$ , может быть выполнено только после завершения действия, отвечающего  $v_i$ ;

3) для каждой  $v_i \in V$  существует хотя бы один путь от вершины  $H$  к  $v_i$  и хотя бы один путь от  $v_i$  к вершине  $K$ .

В свою очередь процесс формального перехода от ПГСА к математическому аппарату сетей Петри происходит на основе подмены вершин параллельной синтаксически корректной граф-схемы алгоритма соответствующими фрагментами сети Петри [8].

Исходя из этого представленная выше постановка задачи разработки методики построения математической модели беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технической диагностики (1) может быть переписана следующим способом:

$$\begin{cases} F = F_C^{\text{БАК}}(F_G^{\text{БАК}}); \\ F_G^{\text{БАК}} : \{\Omega^{\text{БАК}}, R^{\text{БАК}}, \Sigma_G^{\text{ПГСА}}\} \rightarrow G_{\text{БАК}}; \\ F_C^{\text{БАК}} : G_{\text{БАК}} \rightarrow C_{\text{БАК}}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $F_G^{\text{БАК}}$  – оператор, применение которого к вербальному описанию процесса функционирования БАК позволяет синтезировать синтаксически корректную параллельную граф-схему алгоритма  $G_{\text{БАК}}$  на основе порождающих грамматик  $\Sigma_G^{\text{ПГСА}}$ ;  $F_C^{\text{БАК}}$  – оператор, характеризующий формальный переход от синтаксически корректной ПГСА к сети Петри  $C_{\text{БАК}}$ .

Как видно из выражения (3), оператор  $F$  в выражении (1) может быть представлен в виде упорядоченной последовательности операторов преобразования  $F_G^{\text{БАК}}$  и  $F_C^{\text{БАК}}$ .

Необходимо отметить, что задача формализованного представления процесса функционирования БАК на основе применения математического аппарата сетей Петри не является столь очевидной и однозначной, как это может показаться на первый взгляд. Данное утверждение связано с многообразием класса, объединенного понятием математический аппарат сетей Петри. В связи с этим требуется уточнение оператора  $F_C^{\text{БАК}}$  при постановке задачи (3). Для этого воспользуемся принципом развиваемости моделей, предполагающего возможность развития формального построения для каждого последующего этапа синтеза математической модели на основе предыдущей модели путем ее развития [5]. Исходя из этого оператор  $F_C^{\text{БАК}}$  также может быть представлен как упорядоченная последовательность операторов преобразования:

$$F_C^{\text{БАК}} = F_q^{\text{БАК}}(F_s^{\text{БАК}}(F_{mt}^{\text{БАК}}(F_{cpr}^{\text{БАК}}(F_{fc}^{\text{БАК}}))))), \quad (4)$$

где  $F_{fc}^{\text{БАК}}$  – оператор, который преобразует ПГСА в сеть Петри свободного выбора;  $F_{cpr}^{\text{БАК}}$  – оператор, который преобразует сеть Петри свободного выбора в управляющую сеть Петри;  $F_{mt}^{\text{БАК}}$  – оператор, который преобразует управляющую сеть Петри в модифицированную временную сеть Петри;  $F_s^{\text{БАК}}$  – оператор, формирующий статистический граф разметок модифицированной временной сети

Петри;  $F_q^{BAK}$  – оператор, формирующий разрешенный граф разметок исходя из особенностей процесса функционирования БАК.

Обобщенная схема технического диагностирования БАК с ключевыми положениями методики  $M$  синтеза математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса, представленная на рис. 1, может быть представлена следующим образом (рис. 2).

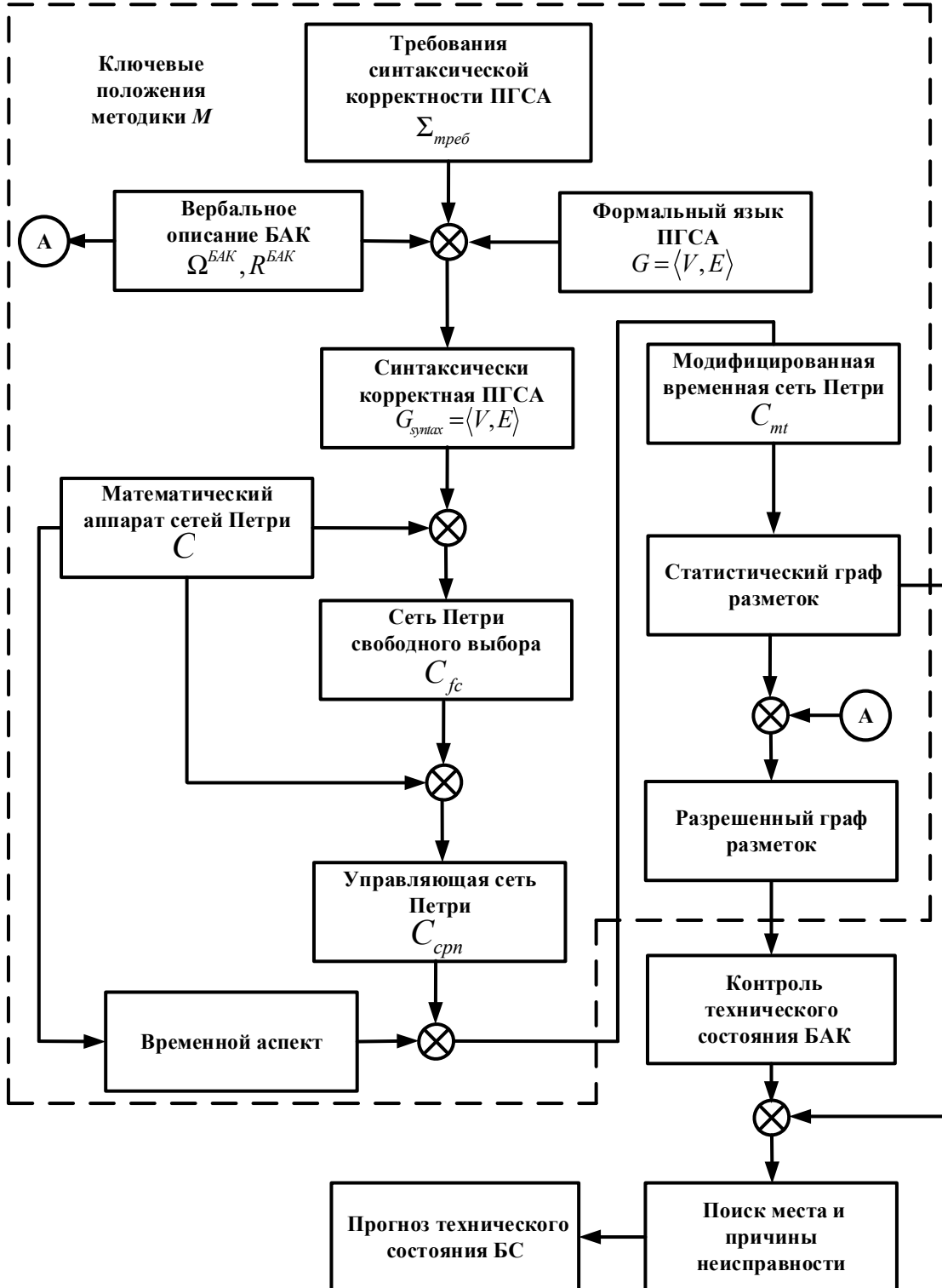


Рис. 2. Системное представление ключевых положений методики синтеза математической модели БАК с целью решения задачи технического диагностирования

На основании вышеизложенного сформулируем методику построения математической модели процесса функционирования БАК с целью решения задач технического диагностирования на основе применения математического аппарата сетей Петри:

1. На основании вербального описания процесса функционирования БАК ( $\Omega^{\text{БАК}}$ ) определяется множество вершин ПГСА  $V$  и  $E$ .

1.1. Определяется множество вершин  $H$ , характеризующих начало алгоритма. Данная операция с математической точки зрения является следующим отображением:

$$f: \omega_j \rightarrow h_i, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, h_i \in H. \quad (5)$$

1.2. Определяется множество операторных вершин  $O$ , характеризующих действия над данными:

$$g: \omega_j \rightarrow o_k, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, o_k \in O. \quad (6)$$

1.3. Определяется множество управляющих вершин  $W, U, L, \Delta$ , характеризующих переход к параллельному выполнению алгоритмов, объединение параллельных ветвей, выделение по условию (условный переход), выход из цикла и соединение взаимоисключающих ветвей (вход в цикл соответственно):

$$\alpha: \begin{cases} \omega_j \rightarrow w_s, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, w_s \in W, \\ \omega_j \rightarrow u_h, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, u_h \in U, \\ \omega_j \rightarrow l_p, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, l_p \in L, \\ \omega_j \rightarrow \lambda_g, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, \lambda_g \in \Delta. \end{cases} \quad (7)$$

1.4. Определяется множество вершин  $K$ , определяющих конец алгоритма:

$$\beta: \omega_j \rightarrow k_f, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, k_f \in K. \quad (8)$$

2. На основании вербального описания процесса функционирования БАК ( $R^{\text{БАК}}$ ) определяется множество дуг  $E$ , характеризующих действия в структуре ПГСА:

$$\beta: r_k \rightarrow e_i, r_k \in R^{\text{БАК}}, e_i \in E. \quad (9)$$

Необходимо отметить, что на данном этапе происходит формирование ПГСА как математической структуры (2) с заданием на множестве  $G$  отношений из  $E$ . Таким образом, сформированная на данном этапе структура ПГСА будет носить первичный характер, на основе которой будет формироваться структура граф-схемы алгоритма с синтаксически корректной структурой. Однако стоит также отметить, что на практике возможен вариант, когда отображение (9) будет достигаться сразу с учетом рассмотренных ниже свойств синтаксической корректности ПГСА.

3. Проверка структуры ПГСА на наличие свойств корректности [7], а именно:

3.1. Проверка полноты процесса функционирования БАК. Данное свойство означает следующее: в корректной граф-схеме любой оператор  $v_i \in V$  входит хотя бы в одну допустимую последовательность выполнения вершин  $W_j$ . При этом любому предусмотренному спецификацией процесса функционирования состоянию системы ставится в соответствие определенная вершина граф-схемы  $v_i$ .

3.2. Проверка на свойство переопределенности процесса функционирования БАК. Данное свойство предполагает наличие в спецификации протокола избыточных частей, реализация которых не может произойти ни при каких условиях. На языке ПГСА переопределенность представляется фрагментом  $G'$  граф-схемы, к входной вершине которого нет пути от начальной  $v_k$  вершины ПГСА.

3.3. Проверка на свойство недоопределенности процесса функционирования БАК. В терминах ПГСА данное свойство означает отсутствие в граф-схеме некоторых последовательностей выполнения вершин (или просто вершин), соответствующих недостающим реакциям на входные воздействия в спецификации процессов, протекающих при функционировании БАК. В такой граф-схеме обязательно найдется некоторая вершина в группе обязательных последователей, в которой будет отсутствовать вершина, соответствующая началу не вошедшей в спецификацию части описания.

Следовательно, граф-схема окажется некорректной с точки зрения отсутствия полной совокупности допустимых последовательностей выполнения вершин.

3.4. Проверка на отсутствие тупиков при формализации процесса функционирования БАК. Различают статический и динамический тупики. Для корректной ПГСА в рамках отсутствия статических тупиков должно выполняться условие

$$\exists v_i \in V \mid (v_i) \bullet = \emptyset, \quad (10)$$

где  $(v_i) \bullet$  – множество последователей вершины  $v_i$ .

Для корректной ПГСА в рамках отсутствия динамических тупиков должно выполняться условие

$$\exists W_i \in W \mid W_i = (v_n, \dots, (v_j, \dots, v_m)_\infty), \quad (11)$$

где подпоследовательность  $(v_j, \dots, v_m)_\infty$  повторяется бесконечное число раз.

3.5. Проверка на отсутствие противоречивости при формализации процесса функционирования БАК. Поясним данное свойство. Отсутствие противоречивости заключается в отсутствии одновременно нескольких взаимоисключающих достижимых состояний при формализации процесса функционирования БАК на одно и то же воздействие.

3.6. Проверка на свойство безопасности при формализации процесса функционирования БАК. Данное свойство должно обеспечиваться в корректной граф-схеме предопределенным заранее набором допустимых последовательностей выполнения вершин, исключающим появление всяких непредвиденных ситуаций попадания в недопустимые состояния. В ПГСА каждая вершина отражает определенное состояние системы. В корректной граф-схеме любая допустимая последовательность выполнения  $W_j$  должна завершаться конечной вершиной  $v_k$ , а в качестве промежуточных состояний в  $W_j$  должны быть все предшественники  $v_k$ , которые в свою очередь заранее определены. Поэтому корректная ПГСА гарантирует наличие свойства безопасности при отражении причинно-следственных связей моделируемого БАК.

4. При необходимости происходит коррекция структуры (2) по каждому из свойств до синтаксической корректности ПГСА  $G_{syntax}$  в целом. Данная операция с математической точки зрения является следующим отображением:

$$\xi : G \rightarrow G_{syntax}, \quad (12)$$

где  $\xi$  – отображение, формализующее переход от обычной ПГСА к синтаксически корректной ПГСА.

5. На данном этапе происходит формальный переход от синтаксически корректной параллельной граф-схемы алгоритма к сети Петри свободного выбора путем замены элементов ПГСА на фрагменты сети:

$$F_{fc} : G_{syntax} \rightarrow C_{fc}, \quad (13)$$

где  $C_{fc}$  – сеть Петри свободного выбора.

6. Переход от сети Петри свободного выбора к управляющей сети Петри, предназначенной для синтеза автомата, управляющего последовательностью выполнения различных функций в процессе работы БАК:

$$F_{cpn} : C_{fc} \rightarrow C_{cpn}, \quad (14)$$

где  $C_{cpn}$  – управляющая сеть Петри.

Необходимо отметить, что этапы формального перехода по пунктам 5 и 6 данной методики не раскрыты в полной мере вследствие их простоты и известности [8].

7. Преобразование управляющей сети Петри в модифицированную временную сеть Петри. Данное преобразование происходит на основе оператора  $F_{mt}$ , являющегося частично неформальным. Неформальное действие этого оператора состоит в дополнении управляющей сети фрагментами, моделирующими появление сигналов, внешних по отношению к управляющим автоматам и форми-



руемых устройствами, работающими под управлением автоматов. Формальное действие оператора  $F_{mi}$  состоит в введении временного аспекта в функционирование управляющей сети.

8. Формирование статистического графа разметок на основе модифицированной временной сети Петри.

9. Выделение разрешенных переходов на основе характеристики запрещенными графами. На данном этапе происходит формализация допустимых с точки зрения решения задачи технического диагностирования режимов работы БАК.

Применение данной методики при формализации процесса функционирования одного из существующего БАК позволило получить граф разметок с пространством состояний равным 25. В свою очередь характеристика запрещенными графами позволила выделить разрешенные переходы в данном графе, исходя из основных режимов работы беспилотного авиационного комплекса, что в свою очередь может быть использовано при разработке программно-алгоритмического обеспечения систем диагностирования.

### Заключение

Как было отмечено ранее, создание математических моделей является первичным по отношению к разработке СМО систем диагностирования БАК. В работе предложен подход к формализации процесса функционирования беспилотных систем на основе применения математического аппарата сетей Петри. В свою очередь вопросы адекватности синтезированных математических моделей нивелированы применением синтаксически корректных параллельных граф-схем алгоритмов на начальном этапе формализации. Полученные результаты подтверждают возможность применения представленного подхода при разработке специального математического обеспечения бортовых систем диагностирования беспилотных авиационных комплексов.

### Список литературы

1. Калинин В. Н. Теоретические основы системных исследований. Краткий авторский курс. СПб. : ВКА им А. Ф. Можайского, 2013. 278 с.
2. Дунаев В. В., Поляков О. М., Фролов В. В. Алгоритмические основы испытаний. М., 1991. 427 с.
3. Котов В. Е. Сети Петри. М. : Наука, 1984. 160 с.
4. Бянкин А. А., Дорошенко В. В. Метод формального описания протоколов функционирования бортовых подсистем обмена информацией объекта // Программирование. 1994. № 5. С. 79–88.
5. Бянкин А. А. Формализация протоколов информационного обмена // Автоматика и вычислительная техника. 1998. № 4. С. 44–53.
6. Ачасова С. М., Бандман О. Л., Пискунов С. В. Методы параллельного микропрограммирования. Новосибирск : Наука, 1981. 177 с.
7. Лоскутов А. И., Бянкин А. А., Семенюк Д. Б., Клыков В. А. Методика синтеза математической модели функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры объектов ракетно-космической техники на основе полимодельного подхода // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 9. С. 27–36.

### References

1. Kalinin V.N. *Teoreticheskie osnovy sistemnykh issledovaniy. Kratkiy avtorskiy kurs = Theoretical foundations of system research. Short author's course.* Saint-Petersburg: VKA im A. F. Mozhayskogo, 2013:278. (In Russ.)
2. Dunaev V.V., Polyakov O.M., Frolov V.V. *Algoritmicheskie osnovy ispytaniy = Algorithmic basis of tests.* Moscow, 1991:427. (In Russ.)
3. Kotov V.E. *Seti Petri = Petri Nets.* Moscow: Nauka, 1984:160. (In Russ.)
4. Byankin A.A., Doroshenko V.V. Method of formal description of the protocols of functioning of on-board subsystems of object information exchange. *Programmirovaniye = Programming.* 1994;5:79–88. (In Russ.)
5. Byankin A.A. Formalization of information exchange protocols. *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika = Automation and computer engineering.* 1998;4:44–53. (In Russ.)
6. Achasova S.M., Bandman O.L., Piskunov S.V. *Metody parallel'nogo mikroprogramirovaniya = Parallel microprogramming methods.* Novosibirsk: Nauka, 1981:177. (In Russ.)
7. Loskutov A.I., Byankin A.A., Semenyuk D.B., Klykov V.A. Method of synthesis of a mathematical model of functioning of onboard radio-electronic equipment of objects of rocket and space technology on the basis of a poly-model approach. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, control, diagnostics.* 2019;9:27–36. (In Russ.)

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Владимир Александрович Никулин**

соискатель,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mail.ru

**Андрей Иванович Лоскутов**

доктор технических наук, профессор,  
начальник кафедры телеметрических систем,  
комплексной обработки и защиты информации,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mail.ru

**Владимир Алексеевич Клыков**

кандидат технических наук,  
преподаватель кафедры телеметрических систем,  
комплексной обработки и защиты информации,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mail.ru

**Екатерина Александровна Ряхова**

адъюнкт кафедры телеметрических систем,  
комплексной обработки и защиты информации,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mail.ru

**Андрей Владимирович Столяров**

адъюнкт кафедры телеметрических систем,  
комплексной обработки и защиты информации,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mail.ru

**Vladimir A. Nikulin**

Applicant,  
Military space Academy named after A. F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

**Andrey I. Loskutov**

Doctor of technical sciences, professor,  
head of sub-department of telemetry systems,  
complex processing and protection of information,  
Military space Academy named after A. F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

**Vladimir A. Klykov**

Candidate of technical sciences,  
teacher of sub-department of telemetry systems,  
complex processing and protection of information,  
Military space Academy named after A. F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

**Ekaterina A. Ryakhova**

Adjunct of sub-department of telemetry systems,  
complex processing and protection of information,  
Military space Academy named after A. F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

**Andrey V. Stolyarov**

Adjunct of sub-department of telemetry systems,  
complex processing and protection of information,  
Military space Academy named after A. F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)