

И.В. Дорожко, Н.А. Осипов

## МЕТОДИКА СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ СТРАТЕГИЙ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

---

*Дорожко И.В., Осипов Н.А. Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами с использованием априорной информации.*

**Аннотация.** Работа посвящена задаче повышения достоверности диагностирования сложных технических систем в условиях неопределенности. На основе апостериорного вывода в байесовских сетях доверия разработана методика диагностирования сложных систем, включающая в себя синтез оптимальной стратегии диагностирования с учетом динамики априорной информации и различных законов распределения непрерывных диагностических признаков.

**Ключевые слова:** диагностирование, байесовская сеть доверия, достоверность, апостериорный вывод.

*Dorozhko I.V., Osipov N.A. Technique of synthesis of optimal strategies for diagnostics of the automated control systems of complex technical objects with the use of aprioristic information.*

**Abstract.** This work is dedicated to the problem of increasing of diagnostics reliability for the complex technical systems in the conditions of the uncertainty. The diagnostic technique of the complex systems was developed on the basis of the posteriori output of the Bayesian belief networks, including synthesis of the optimal diagnostic strategy taking into account dynamics of the aprioristic information and various laws of the distribution of continuous diagnostic signs.

**Keywords:** diagnosing, Bayesian belief networks, reliability, a posterior output.

---

**1. Введение.** Важным элементом эксплуатации и технического обслуживания сложных технических систем является непрерывный контроль вида технического состояния — категории, которая характеризуется соответствием (или несоответствием) качества системы определенным требованиям, задаваемых обычно в виде ограничений на показатели свойств системы (диагностические признаки). Обнаружение возникших дефектов и предупреждение их на ранней стадии развития, а также своевременное принятие правильных решений по устранению дефектов до возникновения аварийной ситуации, при условии наличия необходимого количества достоверной информации, обеспечивают высокий коэффициент готовности, снижение затрат на ремонты, продление срока службы оборудования.

Современные автоматизированные системы управления являются сложными динамическими системами. Следует отметить, что процесс обновления и частичной модернизации автоматизированных систем управления предполагает совместную эксплуатацию элементов, имеющих различную степень набранной статистической информации об отказах и дефектах. Это требует дальнейшего интенсивного развития новых подходов к оценке технического состояния (ТС).

При диагностировании сложных технических систем проблема оперативного и достоверного определения вида технического состояния является весьма актуальной [1, 4]. Особенно остро данная проблема стоит для современных автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения (АСУ ПП РКН) [7]. Низкое качество диагностирования может привести к принятию ошибочных решений на восстановление АСУ ПП либо к запуску РКН с неисправной бортовой аппаратурой, что означает срыв поставленной задачи. Следовательно, актуальной является разработка модели диагностирования АСУ ПП РКН и методики повышения достоверности диагностирования, позволяющих разрешить противоречие между, с одной стороны, высокими требованиями к достоверности диагностирования АСУ ПП, а с другой стороны — отсутствием исчерпывающей информации о техническом состоянии объекта, малым объёмом статистических данных (при создании нового объекта — отсутствием статистических данных). Под достоверностью технического диагностирования понимают степень объективного соответствия результатов диагностирования действительному техническому состоянию объекта [2]. В рамках данной работы достоверность диагностирования оценивается условной вероятностью пребывания объекта в некотором виде технического состояния при условии, что система диагностирования зафиксировала именно этот вид технического состояния [3].

**2. Постановка задачи.** Задача повышения достоверности диагностирования АСУ ПП РКН формулируется в рамках модели  $M_d$ , представленной в виде следующих множеств:

$$M_d = \langle S, Pr, L, W, Y, \Pi, \Omega, T^+(t_0), P, \Theta \rangle,$$

где

- $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$  — множество изображений кластеризованных экспертами видов технических состояний АСУ ПП РКН;

–  $Pr = \{pr_j \mid j = \overline{1, n}\} = \{pr_{j-k_j} \mid j = \overline{1, n}; k_j = \overline{1, \gamma_j}\}$  — множество диагностических признаков (ДП), где  $pr_{j-k_j}$  — подпризнак  $j$ -го ДП, состоящего из  $\gamma_j$  подпризнаков. Например,  $pr_1$  — непрерывный диагностический признак «температура», состоящий из двух подпризнаков: «температура в норме» —  $pr_{1-1} = (5; 35)^\circ\text{C}$  и «температура выше нормы» —  $pr_{1-2} = (45; 55)^\circ\text{C}$ , и т.п.;

–  $L = \{l_{ij} \mid i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$  — множество интервалов, определяющих границы изменения  $pr_{j-k_j} \in Pr$  в изображении вида технического состояния  $S_i \in S$ ;

–  $W: S \times Pr \rightarrow L$  — отображение, устанавливающее связь между  $S = \{S_i \mid i = \overline{0, m}\}$  и  $Pr = \{pr_j \mid j = \overline{1, n}\}$  с одной стороны и множеством  $L = \{l_{ij} \mid i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$  — с другой стороны, такое что  $l_{ij} = W(S_i, pr_{j-k_j})$ ,  $l_{ij} \in L$ ,  $S_i \in S$ ,  $pr_{j-k_j} \in Pr$ ;

–  $Y = \{y_j \mid j = \overline{1, n}\}$  — множество значений диагностических признаков;

–  $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$  — множество проверок диагностических признаков, для которых заданы  $A = \{\alpha_j \mid j = \overline{1, n}\}$  и  $B = \{\beta_j \mid j = \overline{1, n}\}$  — ошибки 1-го и 2-го рода проверок  $\pi_j$ , а также  $T = \{\tau_j \mid j = \overline{1, n}\}$  — длительности проверок ДП;

–  $\Omega = \{R \mid R \subseteq S\}$  — алгебра событий, заданная на множестве  $S = \{S_i \mid i = \overline{0, m}\}$ , в которой элементы  $R$  — это информационные состояния процесса диагностирования, которые образуются в качестве исходов проведенных проверок;

–  $T^+(t_0) = [t_0, +\infty)$  — множество моментов времени, где  $t_0$  — начальный момент времени, а  $t_d \in T^+(t_0)$  соответствует началу диагностирования;

–  $P = \{P(R, t_d) \mid R \in \Omega, t_d \subset T^+(t_0)\}$  — вероятностная мера, заданная на алгебре событий;

–  $\Theta$  — статистические данные (например, интенсивности отказов блоков системы —  $\Lambda = \{\lambda_j | j = \overline{1, m}\}$ ) либо мнения экспертов, на основе которых можно рассматривать объект как динамическую систему, при отсутствии  $\Theta$  объект рассматривается как статическая система.

Требуется найти стратегию диагностирования  $STR_z \subseteq STR$  (т.е. упорядоченное множество (состав и последовательность) проверок диагностических признаков), обеспечивающую определение видов технического состояния с максимальной достоверностью

$$STR^* = \arg \max_{z \in Z} \{ \overline{D}(STR_z) \},$$

где  $\overline{D}(STR_z)$  — средняя достоверность z-й стратегии диагностирования, которая вычисляется как математическое ожидание от достоверностей всех «ветвей» стратегии  $STR_z$ .

Допущения и ограничения:

1. Отказы носят одиночный характер. Предполагается, что в один и тот же момент времени может возникнуть только один отказ;

2. Продолжительность диагностирования не должна увеличиться. Данное ограничение обусловлено жестким графиком выполняемых работ по подготовке РН. При равных длительностях проверок требуется минимизировать количество проверок.

Для решения задачи диагностирования были выбраны байесовские сети доверия (БСД) [19, 20], обладающие следующими преимуществами:

1. Высокая эффективность решения задач для сложных систем, в которых много наблюдаемых переменных, допускающих декомпозицию [13];

2. Учет поступления новой информации — свидетельств (новых данных о результатах проверок диагностических признаков или информации о видах технического состояния);

3. Возможность обработки статистических данных и экспертных оценок;

4. Способность обучаться [8, 14].

Основополагающим в БСД является апостериорный вывод. Суть его заключается в следующем: при поступлении свидетельства необходимо приравнять к нулю несовместимые со свидетельством вероятности исходов и нормировать оставшиеся вероятности, учитывая априорные данные с тем, чтобы вероятности оставшихся исходов в

сумме снова давали единицу [13]. На основе апостериорного вывода в БСД и прямого принципа динамического программирования [18] была разработана методика синтеза оптимальной по достоверности стратегии диагностирования.

**3. Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования АСУ сложными техническими объектами на основе байесовских сетей доверия.** В отличие от известных [3] разработанная методика обладает следующими преимуществами:

- моделирование различных законов распределения непрерывных ДП;
- учет поступления новой информации;
- возможность охвата значительного количества диагностических признаков и видов ТС и связей между ними за счет декомпозиции;
- учет динамики априорной информации при синтезе стратегии.

Методика представляет собой следующую последовательность действий:

1. Построить модель диагностирования на основе БСД:

1.1 шаг. Задать топологию БСД;

1.2 шаг. Указать априорную информацию ( $\{P(S_i) | i = \overline{0, m}\}$ ,  $t_d$ ,  $\{\tau_j | j = \overline{1, n}\}$ ,  $\{\alpha_j | j = \overline{1, n}\}$ ,  $\{\beta_j | j = \overline{1, n}\}$ );

1.3 шаг. Задать модель наблюдения  $\{P(\text{pr}_j / S_i) | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ , используя, в том числе, различные законы распределения непрерывных диагностических признаков внутри интервалов;

1.4 шаг. Задать модель перехода (для динамической БСД);

1.5 шаг. Настроить параметры модели

( $\text{par} = \{P(S_i | i = \overline{0, m}), \{P(\text{pr}_{j,k} / S_i) | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ ) с учетом имеющихся эмпирических данных  $U$ , используя метод обучения:

а) если эмпирические данные представляют собой  $U = \{\text{Pr}, S\}$ , то

1.5.1 шаг. Определить по эмпирическим данным с помощью метода ML:

$\text{par}_{\text{стат}} = \text{par} = \arg \max_{\text{par}} \ln(P[U / \text{par}, \text{топология\_БСД}])$ ;

1.5.2 шаг. Указать объём априорной выборки —  $\text{Bel}$ , и объединить  $\text{par}_{\text{стат}}$  и  $\text{par}_{\text{априор}}$ ;

$$\text{par} = \text{par}_{\text{априор}} \cdot \frac{\text{Bel}}{\nu + \text{Bel}} + \text{par}_{\text{стат}} \cdot \frac{\nu}{\nu + \text{Bel}},$$

где  $\nu$  — объём эмпирической выборки,

а  $\frac{\text{Bel}}{\nu + \text{Bel}}$  — степень доверия к априорной информации.

б) если эмпирические данные представляют собой  $U = \{\text{Pr}\}$ , то запускается EM-алгоритм [5, 8, 14]:

1.5.1 шаг. Найти вероятность последовательности наблюдений в данной модели:

$$P(U / \text{модель}) = \sum_S P(U / S, \text{модель}) \cdot P(S / \text{модель});$$

1.5.2 шаг. Найти оптимальную последовательность состояний при условии данной модели и данной последовательности наблюдений;

1.5.3 шаг. Найти наиболее правдоподобную модель (коррекция параметров модели при условии имеющихся данных);

2. Синтезировать с помощью апостериорного вывода байесовских сетей доверия и прямого принципа динамического программирования оптимальную по достоверности стратегию диагностирования:

2.1 шаг. При начальной неопределенности  $R_0 = \{S_i \mid i = \overline{0, m}\}$  провести распространение возможных результатов проверок диагностических признаков в БСД —  $\{\langle \text{pr}_{j-k_j} \rangle, j = \overline{1, n}\}$ , учитывая  $t_d$  и  $\tau_j$ :

2.2 шаг. Найти возможные промежуточные состояния  $R_\omega (\omega = 1, \dots, (2^{m+1} - 2))$ , которые образуются в качестве исходов проведенных проверок:  $\langle \text{pr}_{j-k_j} \rangle : R_0 \rightarrow R_\omega$ , если  $y_j \in l_{j-k_j}$ , при этом  $R_\omega = \{S_i \in R_0 \mid i : \bigcap_{\{i\}} l_{ij} \neq \emptyset\}$ ;

2.3 шаг. Используя полученный в результате распространения свидетельств  $\{\langle \text{pr}_{j-k_j} \rangle, j = \overline{1, n}\}$  в БСД набор апостериорных вероятностей —  $\{P(S_i / \text{pr}_{j-k_j})_{t=t_d+\tau_j}, i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ , определить для каждой проверки значение функционала. Функционалом является

средневзвешенные по  $\{P(S_i)_{t=t_n+\tau_j}, i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$  значения условных вероятностей видов технических состояний от результатов выбранных проверок  $\{P(S_i / \text{pr}_{j-k_j})_{t=t_n+\tau_j}, i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$  —

$$\overline{D}(\pi_j) = \sum_{\substack{i: S_i \in R \\ i=0, m}} \sum_{\substack{j: l_{ij} \neq 0 \\ k_j=1, \gamma_j}} P(S_i / \text{pr}_{j-k_j})_{t=t_n+\tau_j} P(S_i)_{t=t_n+\tau_j} ;$$

2.4 шаг. Для одинаковых промежуточных состояний найти ту проверку, которая обладает максимальным значением функционала —  $\pi_j = \arg \max_{\pi_j \in \Pi} \{\overline{D}(\pi_j)\}$ ;

2.5 шаг. Для полученных промежуточных состояний, учитывая предыдущую проверку, определенную на шаге 4, найти допустимые проверки и провести распространение возможных результатов проверок диагностических признаков в БСД с целью нахождения новых возможных промежуточных состояний;

2.6 шаг. Выполнить п.3–5. Данный этап повторяется до тех пор, пока все промежуточные состояния не будут состоять из единственного вида технического состояния —  $R = \{S_i\}$ ;

2.7 шаг. Выполняя обратный ход от  $\{S_0\}, \{S_1\}, \dots, \{S_m\}$  к  $R_0 = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ , построить оптимальную стратегию диагностирования, обладающую максимальной средней достоверностью;

3. Диагностирование по синтезированной оптимальной стратегии;

4. Обучение. Учет реализовавшегося сценария стратегии диагностирования, корректировка модели с помощью EM-алгоритма (аналогично шагу 1.5б).

Модель диагностирования с использованием БСД изображена на рис.1.

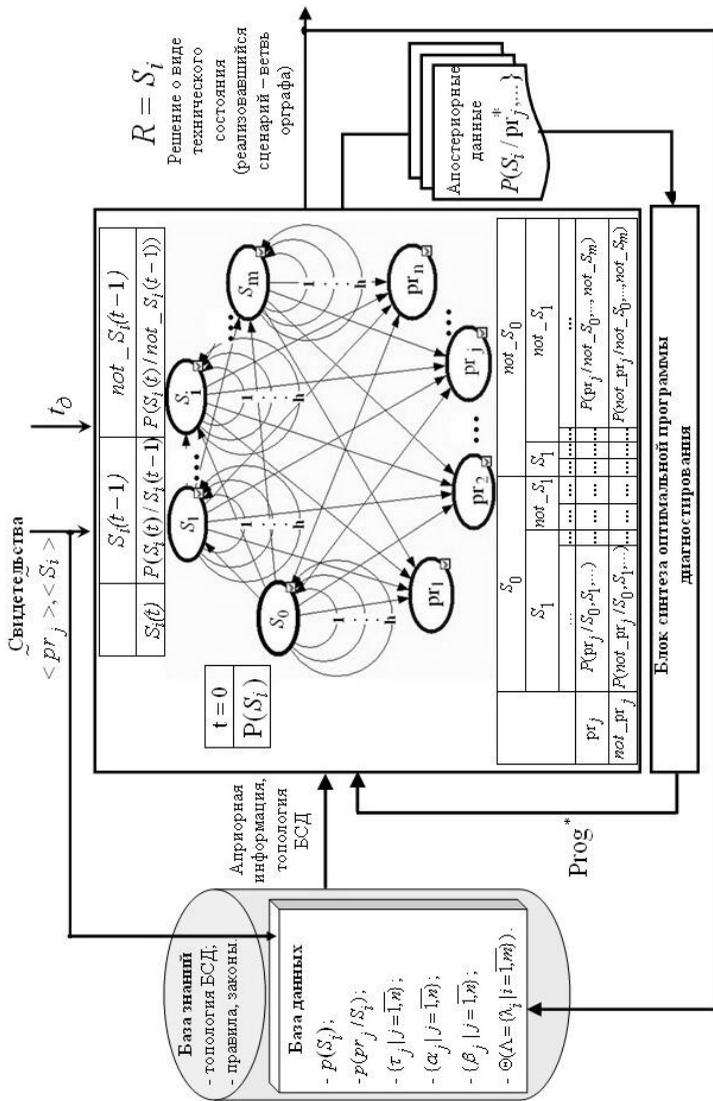


Рис. 1. Модель диагностирования с использованием БСД.

Приведем решение задачи синтеза оптимальной по достоверности стратегии диагностирования на примере стойки управления электропитанием (УЭП), входящей в состав технологического оборудования

АСУ ПП РКН «Союз-2» и предназначенной для подачи стабилизированного гарантированного питания на устройства сопряжения с объектом (УСО), а также для сбора и обработки диагностической информации со стоек УСО и смежных систем.

Состав стойки УЭП и интенсивности отказов блоков приведены в табл. 1.

Таблица 1. Состав стойки УЭП и интенсивности отказов блоков

Название блока	Интенсивность отказа — $\lambda_i$ , 1/час
Устройство ввода, защиты, резервирования питания — УВЗРП8-01	$\lambda_1 = 3.2 \times 10^{-11}$
Вентилятор	$\lambda_2 = 5.0 \times 10^{-7}$
Устройство питания вентилятора	$\lambda_3 = 4.6 \times 10^{-6}$
Устройство питания (источники питания FPS100024) — УП FPS	$\lambda_4 = 3.2 \times 10^{-9}$
Устройство нормирования сигналов УП FPS — УН	$\lambda_5 = 7.0 \times 10^{-6}$
Контроллер УЭП	$\lambda_6 = 1.0 \times 10^{-9}$
Герминаторы CAN1	$\lambda_7 = 5.0 \times 10^{-11}$
Пульт управления подачи напряжения — ПУ УЭП	$\lambda_8 = 3.5 \times 10^{-6}$
Устройство сопряжения с объектом — УСО47	$\lambda_9 = 9.0 \times 10^{-11}$
Стойка УЭП	$\lambda_{УЭП} = 1.6 \times 10^{-5}$

В качестве видов ТС определим состояния, приведенные в табл. 2:

Таблица 2. Виды технических состояний стойки УЭП

Вид технического состояния	
$S_0$ — работоспособное	$S_5$ — отказ устройства УН1
$S_1$ — отказ устройства УВЗРП8-01	$S_6$ — отказ контроллера УЭП
$S_2$ — отказ вентилятора	$S_7$ — отказ терминаторов CAN1
$S_3$ — отказ устройства питания вентилятора	$S_8$ — отказ панели ПУ УЭП
$S_4$ — отказ устройств УП FPS	$S_9$ — отказ устройства УСО47

При экспоненциальном распределении вероятности безотказной работы блоков УЭП вероятности видов ТС определяются соотношениями [3], где  $n$  — число блоков УЭП:

$$P(S_0) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i t}}}, \quad P(S_i) = \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i t} \left( 1 + \sum_{i=1}^n \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i t}} \right)}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Выберем два непрерывных ДП —  $pr_1$  (температуру) и  $pr_2$  (напряжение) — и дискретный восьмиразрядный ДП —  $pr_3$ , каждый разряд которого может принимать бинарное значение  $\{0,1\}$  (табл. 3 и рис. 2):

Таблица 3. **Модельные значения признаков диагностируемой стойки УЭП**

$S_i$	$pr_j$									
	$pr_1, ^\circ\text{C}$	$pr_2, \text{В}$	$pr_3$							
			$pr_{37}$	$pr_{36}$	$pr_{35}$	$pr_{34}$	$pr_{33}$	$pr_{32}$	$pr_{31}$	$pr_{30}$
$S_0$	[5; 35]	[20; 25]	0	0	0	0	0	0	0	0
$S_1$	[5; 35]	[0; 20]	0	0	1	0	0	0	0	0
$S_2$	[35; 55]	[20; 25]	0	0	0	0	0	0	0	0
$S_3$	[35; 55]	[0; 20]	0	0	0	0	0	0	0	0
$S_4$	[5; 35]	[0; 20]	0	0	0	1	0	0	0	0
$S_5$	[5; 35]	[0; 20]	1	1	0	0	0	0	0	0
$S_6$	[5; 35]	[0; 20]	0	0	0	0	1	0	0	0
$S_7$	[5; 35]	[0; 20]	1	0	0	0	0	0	1	0
$S_8$	[5; 35]	[0; 20]	0	0	0	0	0	0	0	1
$S_9$	[5; 35]	[0; 20]	1	0	0	0	0	1	0	0

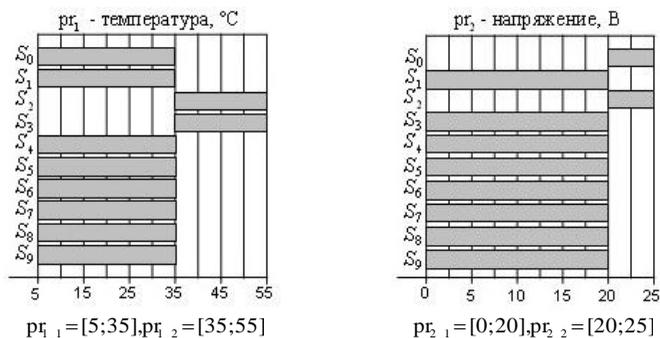


Рис. 2. Модельные значения непрерывных признаков  $r_1$  и  $r_2$ .

В БСД при описании связей между состояниями и признаками есть возможность учитывать достоверности проверок диагностических признаков, что в свою очередь повысит качество и обоснованность принимаемых решений. В условиях задачи примем заданными ошибки первого и второго рода. Соответствующие им вероятности представлены в табл. 4.

Таблица 4. Ошибки первого и второго рода

Проверка	$\alpha_j$	$\beta_j$
$\pi_1$	0.06	0.08
$\pi_2$	0.02	0.07
$\pi_3$	0.01	0.05

Байесовская сеть доверия стойки УЭП представлена на рис. 3. Данными для построения байесовской сети являются вероятности видов технических состояний, определяемые по формулам (1), и модельные значения признаков (табл. 3 и рис. 2).

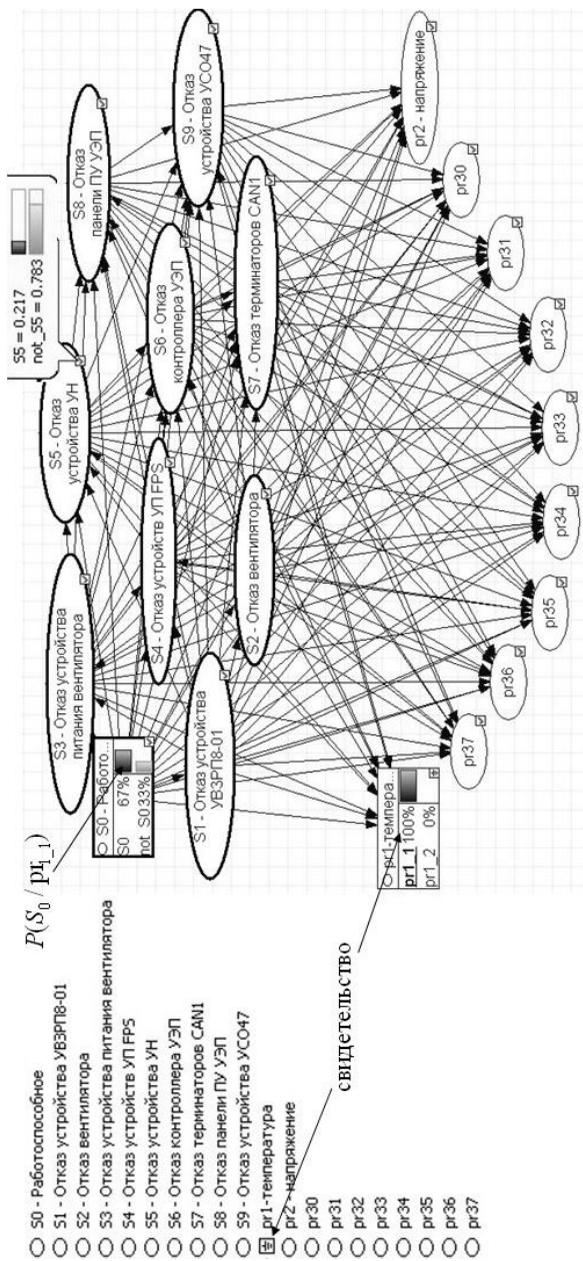


Рис. 3. Байесовская сеть доверия стойки УЭП.

На рис. 4 изображены оптимальные по достоверности стратегии диагностирования для наработок (моментов начала диагностирования)  $t = 2$  ч и  $t = 40000$  ч, полученные в результате применения разработанной методики.

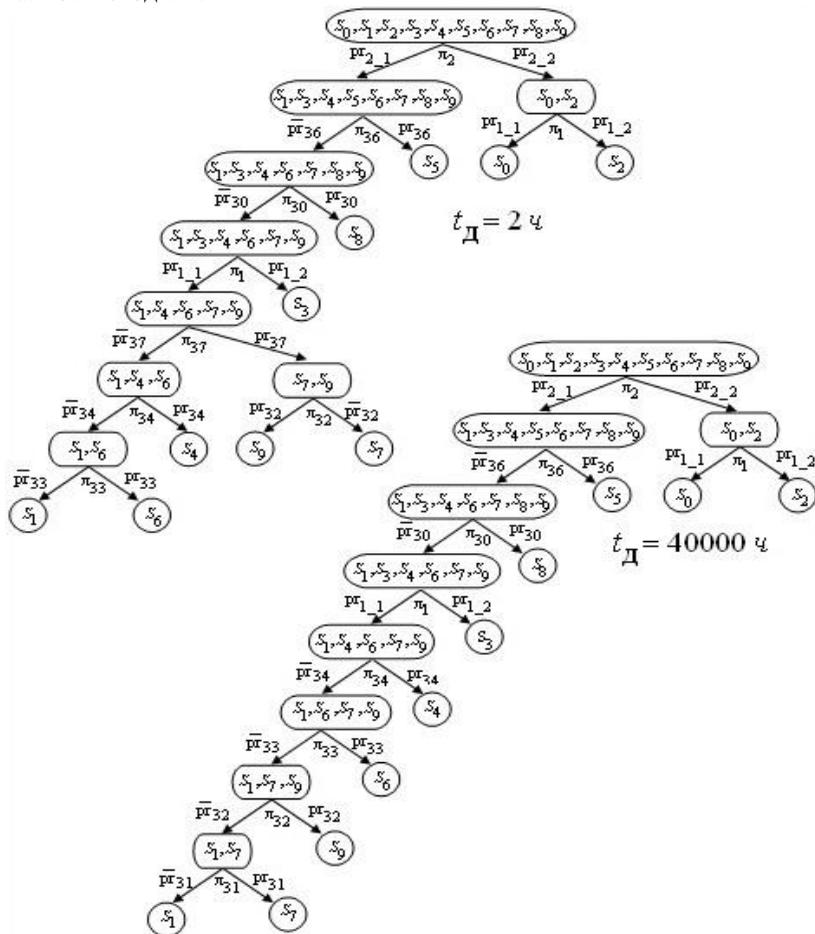


Рис. 4. Оптимальные по достоверности стратегии диагностирования для наработок  $t = 2$  ч и  $t = 40000$  ч.

Сравним среднюю достоверность синтезированной стратегии диагностирования со средней достоверностью безусловной стратегии, которая представляет собой одновременную неупорядоченную про-

верку при начальной неопределенности всех диагностических признаков. Результатом диагностирования по безусловной стратегии является вид технического состояния, изображение которого присутствует во всех исходах проверок. Для стойки УЭП при наработке  $t = 40000$  ч средняя достоверность безусловной ( $\bar{D}_\delta$ ) и оптимальной стратегии ( $\bar{D}(\text{STR}^*)$ ) равны соответственно:

$$\bar{D}_\delta = 0.868, \bar{D}(\text{STR}^*) = 0.964. \quad (2)$$

В результате сравнения получаем повышение достоверности на 11%.

При рассмотрении непрерывных ДП обычно используется равномерный закон распределения значений ДП внутри интервалов [3], использование же других законов распределения, в частности, нормального, может быть обосновано и целесообразно. Например, на границах интервала может наблюдаться наибольшая неопределенность между состояниями, а в середине интервалов данная неопределенность будет минимальна. На рис. 5 показаны непрерывные диагностические признаки с учетом нормального распределения значений внутри интервала.

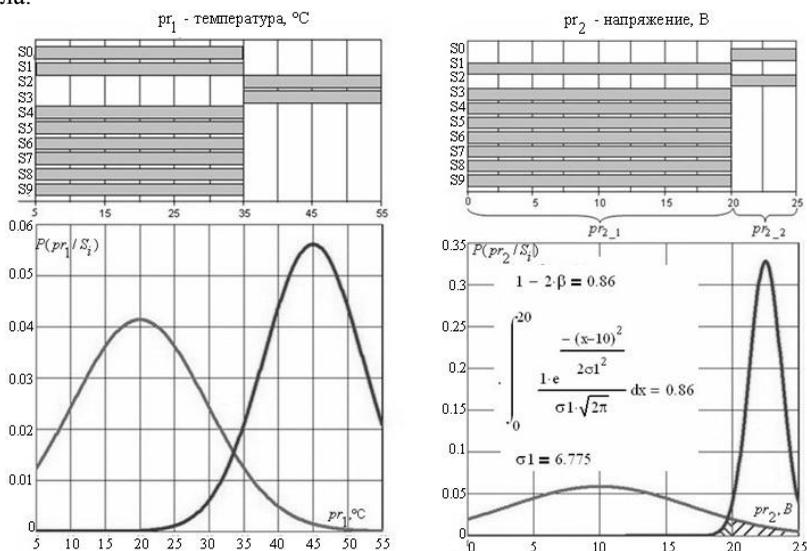


Рис. 5. Модельные значения непрерывных признаков  $pr_1$  и  $pr_2$  с учетом нормального закона распределения значений внутри интервалов.

Оптимальные по достоверности стратегии диагностирования для равномерного и нормального законов распределения значений непрерывных диагностических признаков представлены на рис. 6.

а) при равномерном законе распределения непрерывных диагностических признаков в внутри интервала

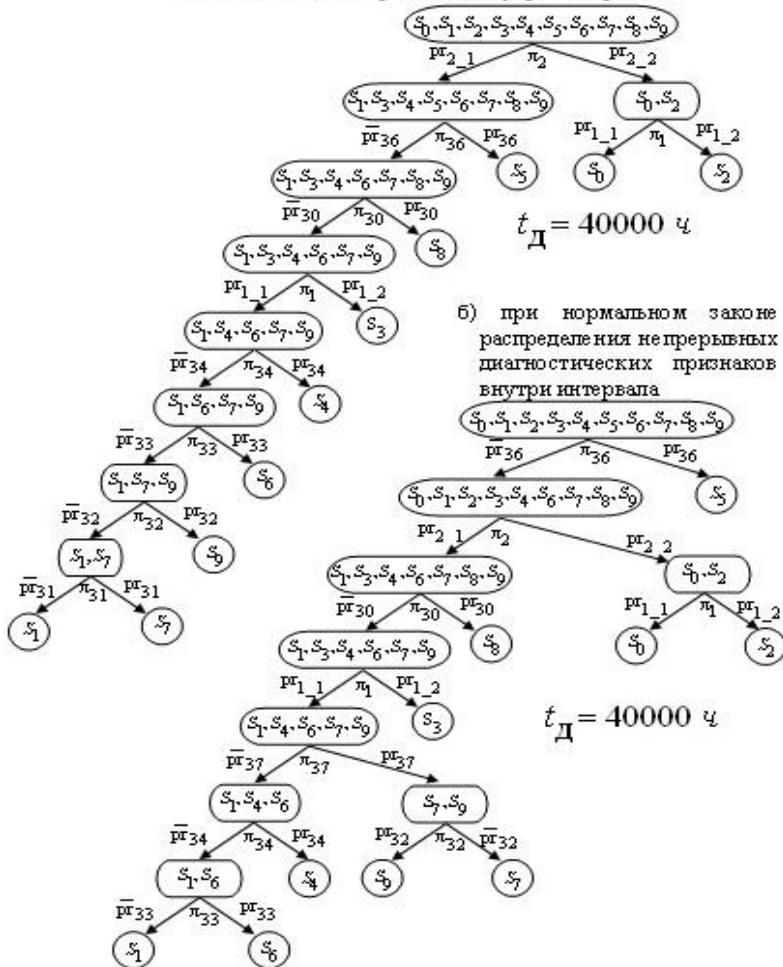


Рис. 6. Оптимальные по достоверности стратегии диагностирования для равномерного и нормального законов распределения значений диагностических признаков внутри интервалов.

Если проверки проводятся в моменты времени, разнесенные по циклу эксплуатации, а также, если  $\tau_j$  сопоставимы с изменением вероятностей видов технических состояний, то при синтезе стратегий диагностирования следует учитывать динамику априорной информации.

Осуществим синтез оптимальной по достоверности стратегии диагностирования, учитывающей динамику априорной информации, на примере системы вентиляции, входящей в состав «Устройств Управления электропитанием» (УУ-ЭП), «Устройств электропитания» (УЭП) АСУ ПП РКН «Союз-2». На рис. 7 представлены исходные данные и модель системы в виде БСД.

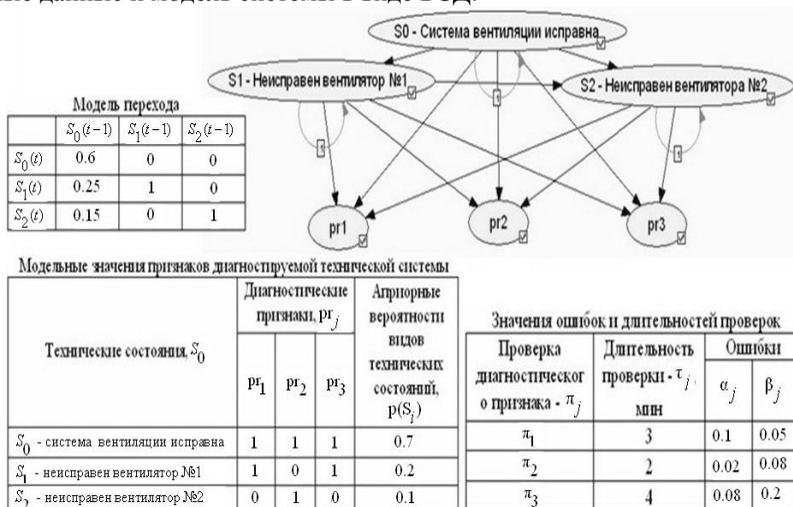


Рис. 7. Исходные данные для построения модели и синтеза оптимальной стратегии диагностирования системы с помощью БСД.

Получены следующие результаты расчета средних достоверностей стратегий диагностирования с учетом динамики априорной информации:

$$\begin{aligned} \overline{D}(\text{STR}_1 = \{\pi_1, \pi_2\}) &= 0.911; \\ \overline{D}(\text{STR}_2 = \{\pi_2, \pi_1\}) &= 0.958; \\ \overline{D}(\text{STR}_3 = \{\pi_3, \pi_2\}) &= 0.916. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \overline{D}(\text{STR}_4 = \{\pi_2, \pi_3\}) &= [P(S_0 / \overline{pr}_2 \overline{pr}_3)_{t=t_d+\tau_2+\tau_3} \times P(S_0 / \overline{pr}_2)_{t=t_d+\tau_2+\tau_3} + \\ &+ P(S_2 / \overline{pr}_2 \overline{pr}_3)_{t=t_d+\tau_2+\tau_3} \times P(S_2 / \overline{pr}_2)_{t=t_d+\tau_2+\tau_3}] \times \\ &\times [P(S_0)_{t=t_d+\tau_2} + P(S_2)_{t=t_d+\tau_2}] + P(S_1 / \overline{pr}_2)_{t=t_d+\tau_2} \times P(S_1)_{t=t_d+\tau_2} = 0.964. \end{aligned}$$

Очевидно, что оптимальной по достоверности является стратегия  $\text{STR}^* = \{\pi_2, \pi_3\}$ , представленная на рис. 8. В данном случае выигрыш по достоверности стратегии  $\text{STR}_4$  по сравнению с остальными составляет от 0.62 % до 5.5 %. Жесткие требования к методике оценки технического состояния и надежности ракетно-космических комплексов обуславливают необходимость учитывать даже столь сравнительно небольшой положительный эффект.

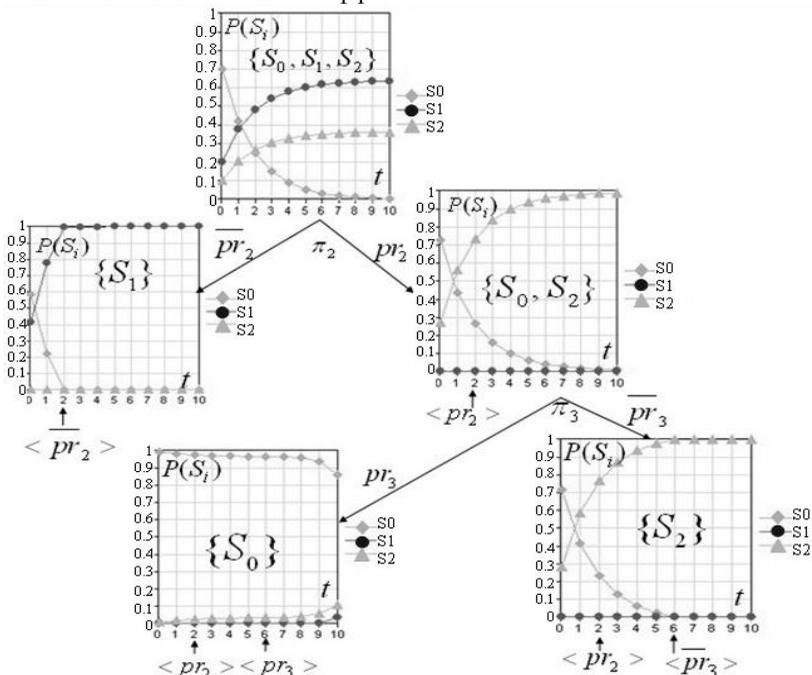


Рис. 8. Оптимальная по достоверности стратегия диагностирования с учетом динамики априорной информации.

**4. Заключение.** Разработанная методика позволяет на основе апостериорного вывода в БД синтезировать оптимальные по достовер-

ности стратегии диагностирования с учетом динамики априорной информации и различных законов распределения диагностических признаков, что расширяет рамки применимости и повышает качество методического аппарата исследований вопросов диагностики. Помимо рассмотренных в работе БСД существуют также родственные им модели — алгебраические байесовские сети (АБС) [9, 12–15], которые позволяют использовать интервальные оценки истинности, что дает возможность более обоснованно представлять априорную информацию. В теории АБС также занимаются исследованием структур, схожих с теми, что представлены на рис. 3 и 7 [6, 10, 11, 16, 17]. Дальнейшие направления исследований связаны именно с использованием АБС при моделировании процесса диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами.

### Литература

1. *Благовещенская М.М., Злобин Л.А.* Информационные технологии систем управления технологическими процессами. М.: Высш. шк., 2005. 768 с.
2. ГОСТ В 20.911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. — Введ. 01.01.1991. М.: Издательство стандартов, 1990. 12 с.
3. *Дмитриев А.К., Юсупов Р.М.* Идентификация и техническая диагностика. МО СССР, 1987. 521 с.
4. *Кульба В.В., Ковалевский С.С., Шелков А.Б.* Достоверность и сохранность информации в АСУ. М.: СИНТЕГ, 2003. 500 с.
5. *Николенко С.И., Тулупьев А.Л.* Самообучающиеся системы. М.: МЦНМО, 2009. 288 с.
6. *Опарин В.В., Фильченков А.А., Тулупьев А.Л., Сироткин А.В.* Матроидное представление семейства графов смежности над набором фрагментов знаний // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. Вып. 4. С. 73–76.
7. *Полянский В.И.* Техническое диагностирование автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения. СПб.: ВКУ, 2002. 303 с.
8. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1408 с.
9. *Сироткин А.В., Тулупьев А.Л.* Моделирование знаний и рассуждений в условиях неопределенности: матрично-векторная формализация локального синтеза согласованных оценок истинности // Труды СПИИРАН. 2011. Вып. 18. С. 108–136.
10. *Тулупьев А. Л.* Байесовские сети: логико-вероятностный вывод в циклах. СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2008. 140 с. (Элементы мягких вычислений.)
11. *Тулупьев А. Л.* Метод построения и исследования баз фрагментов знаний с неопределенностью // Труды СПИИРАН. 2002. Вып. 1, т. 1. СПб.: Наука, 2002. С. 258–271.
12. *Тулупьев А. Л.* Непротиворечивость оценок вероятностей в идеалах конъюнктов и дизъюнктов // Вестник СПбГУ. Сер. 10. 2009. Вып. 2. С. 121–131.
13. *Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В.* Байесовские сети: логико-вероятностный подход. СПб.: Наука, 2006. 607 с.

14. Тулупьев А.Л., Сироткин А.В., Николенко С.И. Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах. СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2009. 400 с.
15. Тулупьев А.Л., Фильченков А.А., Вальтман Н.А. Алгебраические байесовские сети: задачи автоматического обучения // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. № 11, т. 9. С. 57–61.
16. Фильченков А.А., Тулупьев А.Л., Сироткин А.В. Особенности анализа вторичной структуры алгебраической байесовской сети // Труды СПИИРАН. 2010. Вып. 1(12). С. 97–118.
17. Фильченков А.А., Тулупьев А.Л., Сироткин А.В. Структурный анализ клик максимальных графов смежности алгебраических байесовских сетей // Вестн. Тверск. гос. ун-та. Сер.: Прикладная математика. 2011. №20. С. 139–151.
18. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование. М.: Мир, 1967. 507 с.
19. Jensen F. Bayesian Networks and Decision Graphs. NY.: Springer. 2001. 286 p.
20. Pearl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems. NY.: Morgan Kaufman, 1988. 552 p.

**Дорожко Игорь Владимирович** — адъюнкт кафедры автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: контроль и диагностирование автоматизированных систем управления сложными техническими объектами. Число научных публикаций — 12. Doroghko-Igor@yandex.ru; ФВГОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского», ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197082, РФ; р.т. +7(812)347-95-26. Научный руководитель — Н.А. Осипов.

**Dorozhko Igor Vladimirovich** — post-graduate student of Department of the Automated systems of preparation and launch of space rockets Mozhaysky Military-Space Academy. Research interests: control and diagnostics of automated control systems of complex technical objects. The number of publication — 12. Doroghko-Igor@yandex.ru; Mozhaysky Military-Space Academy, ул. Zhdanovskaya st., 13, St.Peterburg, 197082, Russia; office phone +7(812)347-95-26.

**Осипов Никита Алексеевич** — канд.техн.наук, доцент; заместитель начальника кафедры автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. Область научных интересов: контроль и диагностирование автоматизированных систем управления сложными техническими объектами. Число научных публикаций — 35. bayes@mail.ru; ФВГОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского», ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197082, РФ; р.т. +7(812)347-95-26.

**Osipov Nikita Alekseevich** — Ph.D., associate professor; deputy chief of Department of the Automated systems of preparation and launch of space rockets Mozhaysky Military-Space Academy. Research interests: control and diagnostics of automated control systems of complex technical objects. The number of publication — 35. bayes@mail.ru; Mozhaysky Military-Space Academy, ул. Zhdanovskaya st., 13, St.Peterburg, 197082, Russia; office phone +7(812)347-95-26.

Рекомендовано лаб. ТиМПИ, зав. лаб. Тулупьев А.Л, д. физ.-мат. н., доцент.  
Статья поступила в редакцию 12.03.2012.

## РЕФЕРАТ

### *Дорожко И.В., Осипов Н.А.* **Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами с использованием априорной информации.**

Автоматизированные системы управления являются одним из важнейших элементов сложных технических объектов. Основное назначение автоматизированных систем управления — это эффективное управление организационными и техническими процессами, повышение качества эксплуатации и надежности сложных технических объектов.

Современные автоматизированные системы управления представляют собой сложные динамические системы, которые при проведении обновлений и частичной модернизации предполагают совместную эксплуатацию элементов, имеющих различный объем статистической информации об отказах и дефектах, а порой и полное отсутствие данной информации. Это требует дальнейшего интенсивного развития новых подходов к оценке технического состояния, так как существующие модели не достаточно полно отражают протекающие процессы в объекте диагностирования.

При диагностировании сложных технических систем, таких как автоматизированные системы управления подготовкой и пуском ракет космического назначения, проблема достоверности принятия решения стоит весьма остро. Низкое качество диагностирования может привести к принятию ошибочных решений и негативно повлиять на восстановление объекта диагностирования, что приводит к снижению оперативности, либо к запуску ракеты космического назначения с неисправной бортовой аппаратурой, что означает срыв поставленной задачи.

В статье предложена методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами, основанная на математическом аппарате байесовских сетей доверия. Применение байесовских сетей доверия в моделях диагностирования позволяет повысить достоверность результатов диагностирования за счет возможности учета динамики априорной информации, охвата значительного объема диагностических признаков и их связей с видами технического состояния, а также использования различных законов распределения значений непрерывных диагностических признаков. Разработанная методика включает в себя алгоритмы обучения, что также повышает достоверность результатов диагностирования по мере поступления статистической информации.

В работе представлен пример синтеза оптимальных стратегий диагностирования составной части технологического оборудования автоматизированной системы управления подготовкой и пуском ракеты космического назначения.

По мнению авторов, результаты исследований могут представлять интерес для разработчиков автоматизированных систем управления сложными техническими объектами.

## SUMMARY

### ***Dorozhko I.V., Osipov N.A. Technique of synthesis of optimal strategies for diagnosis of the automated control systems of complex technical objects with the use of aprioristic information.***

Automated control systems are one of the most important elements of complex technical objects. The main purpose of automated management systems is the effective management of organizational and technical-governmental processes, improvement of the quality of operation and the reliability of complex technical objects.

The modern automated control systems are complex dynamical systems, which during partial updates and modernization involve joint operation of the elements having different amount of statistical information on faults and defects, max, and sometimes the complete absence of this information. This requires further intensive development of new approaches to the assessment of technical conditions as the existing models do not adequately reflect the processes occurring in the object of diagnostics.

When the diagnostics of complex technical systems, such as automated systems of preparation and launch of space rockets, the problem of reliability of the decision is very acute. Poor quality of diagnostics could lead to erroneous decisions on the recovery of the object of diagnostics, which leads to a reduction of operativeness, or to the launching a space rocket with a faulty on-board equipment, which means the failure of the task.

The paper proposes a method of synthesis of optimal strategies for diagnostics of automated control systems for complex technical objects based on the mathematical formalism of bayesian belief networks. The use of bayesian belief networks in the models of diagnosing allows to increase the reliability of diagnostics by taking into account possibilities of the dynamics of a prior information, a significant coverage of the volume of diagnostic characters and their relationships with the types of technical condition and the use of various laws of distribution of continuous diagnostic signs. The developed method involves learning algorithms, which also increase the reliability of diagnostics upon receiving the statistical information.

This paper presents an example of synthesis of optimal diagnostic strategies of the part of technological equipment of automated systems of preparation and launch of space rockets.

According to the authors, the results of studies can be of interest to developers of automated control systems for complex technical objects.