
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 629.7.071

А. Б. КУЗНЕЦОВ, Н. А. ОСИПОВ, И. В. ДОРОЖКО

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается задача повышения достоверности диагностирования сложных технических систем в условиях неопределенности. Разработана методика оптимальной стратегии диагностирования сложных систем с использованием аппарата байесовских сетей доверия.

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

Введение. При диагностировании сложных технических систем проблема оперативного и достоверного определения вида их состояния весьма актуальна. Проблема достоверности диагностирования особенно важна для современных автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения (АСУ ПП РКН). Низкое качество диагностирования может привести к принятию ошибочных решений по восстановлению таких систем либо к запуску ракет с неисправной бортовой аппаратурой.

Постановка задачи. Задача повышения достоверности диагностирования АСУ ПП РКН_д 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

$S = \{S_i \mid i = \overline{0, m}\}$ — множество видов технических состояний (ТС) системы;

$Pr = \{pr_j \mid j = \overline{1, n}\} = \{pr_{j_k} \mid j = \overline{1, n}; k_j = \overline{1, \gamma_j}\}$ — множество диагностических признаков (ДП) системы, где pr_{j_k} — подпризнак j -го ДП, состоящего из γ_j подпризнаков;

$L = \{l_{ij} \mid i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ — множество интервалов, определяющих границы изменения $pr_{j_k} \in Pr$ для 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, такое что $l_{ij} = W(S_i, pr_{j_k})$, $l_{ij} \in L$, $S_i \in S$, $pr_{j_k} \in Pr$;

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

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

$\Omega = \{R_\omega | \omega = 0, \dots, (2^{m+1} - 1)\}$ — алгебра событий, заданная на множестве $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$, в которой элементы R_ω — это состояния процесса диагностирования, формируемые в качестве исходов проведенных проверок на различных этапах диагностирования;

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

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

Θ — априорная информация, представленная в виде статистических данных об изделиях-аналогах (например, интенсивности отказов блоков системы — $\Lambda = \{\lambda_i | i = \overline{1, m}\}$) либо мнений экспертов.

Требуется определить состав и последовательность (упорядоченное множество) проверок диагностических признаков стратегии $STR_z \subseteq STR$, обеспечивающей определение соответствующего технического состояния системы с максимальной достоверностью:

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

где $\overline{D}(STR_z)$ — средняя достоверность z -й стратегии диагностирования.

В рамках задачи приняты следующие допущения и ограничения:

- виды технического состояния должны быть наблюдаемы;
- отказы носят одиночный характер;
- продолжительность диагностирования не должна увеличиться.

Для решения задачи были выбраны байесовские сети доверия (БСД), обладающие следующими преимуществами:

- высокой эффективностью решения задач для сложных систем с множеством наблюдаемых переменных;
- возможностью учета новой поступающей информации — свидетельств (новых данных о результатах проверок диагностических признаков или информации о техническом состоянии системы);
- возможностью обработки статистических данных и экспертных оценок;
- способностью к обучению.

Основопологающим в байесовской сети доверия является апостериорный вывод. Суть его заключается в следующем: при поступлении свидетельства необходимо приравнять к нулю несовместимые с ним вероятности исходов и пронормировать, учитывая априорные данные, вероятности оставшихся исходов, так чтобы их сумма составляла единицу [1]. На основе апостериорного вывода в БСД и прямого принципа динамического программирования [2] была разработана методика синтеза оптимальной по достоверности стратегии диагностирования АСУ сложными техническими объектами на основе байесовских сетей доверия.

Методика диагностирования. Разработанная методика, в отличие от известных, обладает такими возможностями, как:

- учет различных законов распределения непрерывных диагностических признаков;
- учет поступления новой информации;
- охват значительного количества диагностических признаков и видов технического состояния системы и связей между ними;

— учет динамики априорной информации при синтезе стратегии.

Методика представляет собой выполнение следующих действий.

1. Построить модель диагностирования на основе БСД:

— задать топологию БСД (причинно-следственные связи между множествами $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ и $Pr = \{pr_j | j = \overline{1, n}\}$);

— указать априорную информацию $\Theta (\{P(S_i) | i = \overline{0, m}\}, t_d, \{\tau_j | j = \overline{1, n}\}, \{\alpha_j | j = \overline{1, n}\}, \{\beta_j | j = \overline{1, n}\})$;

— задать модель наблюдения ($\{P(pr_j / S_i) | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$), используя, в том числе, различные законы распределения непрерывных ДП внутри интервалов;

— на основе априорной информации Θ задать модель перехода: задать вероятности технических состояний в текущий момент времени в зависимости от технических состояний в предыдущие моменты времени [3]; если ТС $S_i(t)$ зависит только от $S_i(t-1)$, то задается модель перехода 1-го порядка; модели перехода более высоких порядков позволяют уточнить модель процесса диагностирования (например, для имитации временных отказов), однако увеличивают ее сложность.

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

Шаг 1. При начальной неопределенности $R_0 = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ распространить возможные результаты проверок диагностических признаков $\{< pr_{j_k_j} >\}$ в БСД, учитывая t_d и τ_j .

Шаг 2. Найти возможные промежуточные состояния $R_\omega (\omega = 1, \dots, (2^{m+1} - 2))$, которые формируются в качестве исходов проведенных проверок $< pr_{j_k_j} > : R_0 \rightarrow R_\omega$, если $y_j \in I_{j_k_j}$, при этом $R_\omega = \{S_i \in R_0 | i: \bigcap_{\{i\}} I_{ij} \neq \emptyset\}$.

Шаг 3. Используя полученный в результате распространения свидетельств $\{< pr_{j_k_j} >\}$ в БСД набор апостериорных вероятностей $\{P(S_i / pr_{j_k_j})_{t=t_d+\tau_j}, i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$, определить для каждой проверки значение функционала. Функционалом являются средневзвешенные по $\{P(S_i)_{t=t_d+\tau_j}, i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ значения условных вероятностей зависимости видов технических состояний от результатов выбранных проверок:

$$\overline{D}(\pi_j) = \sum_{\substack{i: S_i \in R, \\ i = \overline{0, m}}} \sum_{\substack{j: I_{ij} \neq \emptyset, \\ k_j = \overline{1, \gamma_j}}} P(S_i / pr_{j_k_j})_{t=t_d+\tau_j} P(S_i)_{t=t_d+\tau_j}.$$

Шаг 4. Для одинаковых промежуточных состояний найти проверку, которая обладает максимальным значением функционала.

Шаг 5. Для полученных промежуточных состояний, учитывая проверку, определенную на шаге 4, найти допустимые проверки и осуществить распространение возможных результатов проверок диагностических признаков в БСД в целях нахождения новых возможных промежуточных состояний.

Шаг 6. Выполнить шаги 3—5. Данный шаг повторяется до тех пор, пока все промежуточные состояния не будут состоять из единственного вида технического состояния $R = \{S_i\}$.

Шаг 7. 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 полученного сценария стратегии диагностирования, корректировка априорной информации.

Модель диагностирования с использованием БСД представлена на рис. 1

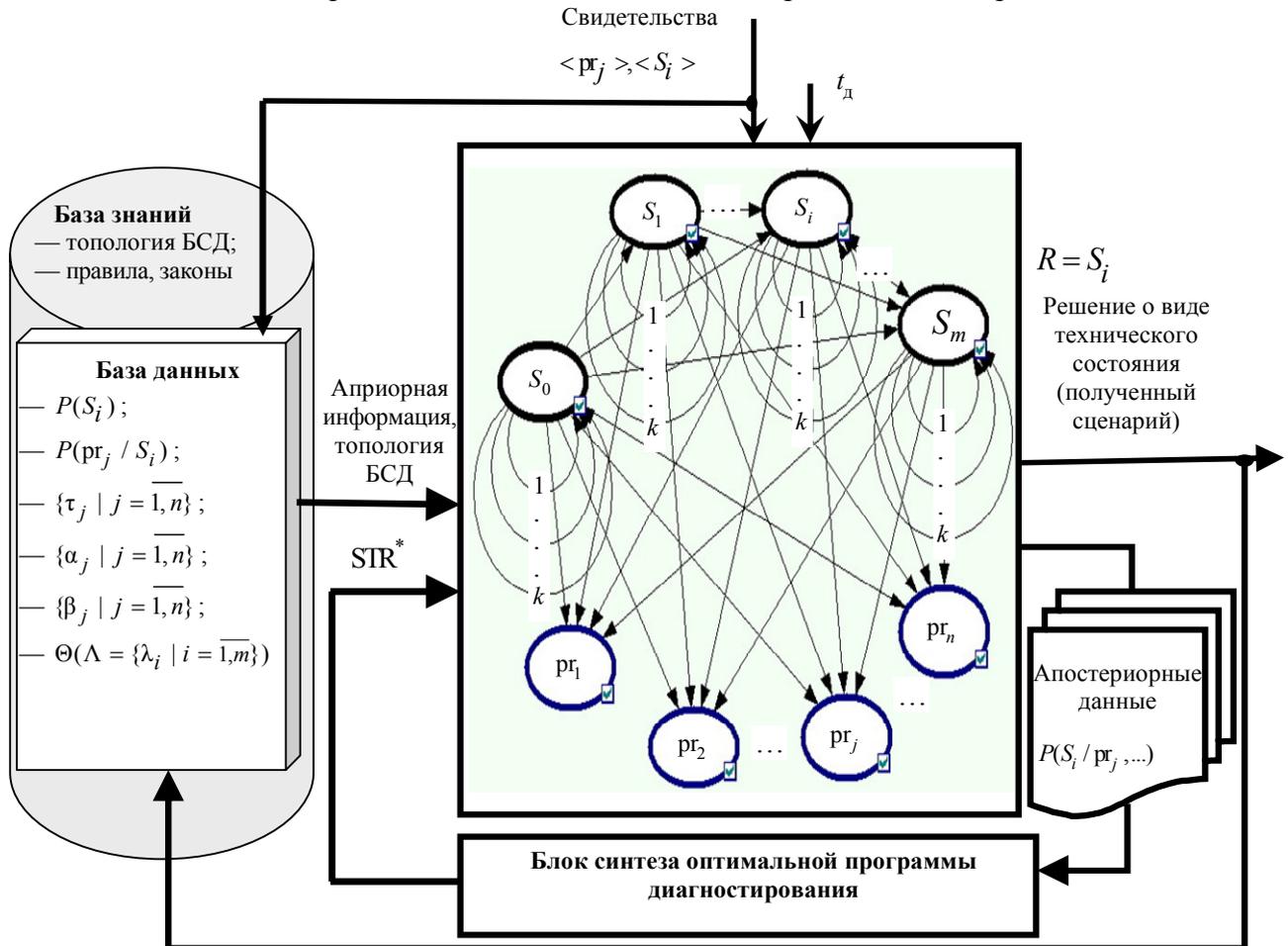


Рис. 1

Приведем решение задачи синтеза оптимальной по достоверности стратегии диагностирования на примере стойки „Устройство электропитания“ (УЭП), входящей в состав технологического оборудования АСУ ПП РКН „Союз-2“. Стойка УЭП предназначена для подачи стабилизированного гарантированного питания на устройства сопряжения с объектом, а также для сбора и обработки диагностической информации с этих стоек и смежных систем.

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

Таблица 1

Название блока	Интенсивность отказа $\lambda_i, ч^{-1}$
Устройство ввода, защиты, резервирования питания — УВЗРП8-01	$\lambda_1=3,2 \cdot 10^{-11}$
Вентилятор	$\lambda_2=5,0 \cdot 10^{-7}$
Устройство питания вентилятора	$\lambda_3=4,6 \cdot 10^{-6}$
Устройство питания (источники питания FPS100024) — УП FPS	$\lambda_4=3,2 \cdot 10^{-9}$
Устройство нормирования сигналов УП FPS — УН	$\lambda_5=7,0 \cdot 10^{-6}$
Контроллер УЭП	$\lambda_6=1,0 \cdot 10^{-9}$
Терминаторы CAN1	$\lambda_7=5,0 \cdot 10^{-11}$
Пульт управления подачи напряжения — ПУ УЭП	$\lambda_8=3,5 \cdot 10^{-6}$
Устройство сопряжения с объектом — УСО47	$\lambda_9=9,0 \cdot 10^{-11}$
Стойка УЭП	$\lambda_{УЭП}=1,6 \cdot 10^{-5}$

В табл. 2 представлены виды технического состояния системы.

Таблица 2

S_i	Вид ТС	S_i	Вид ТС
S_0	Работоспособное	S_5	Отказ устройства УН
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 устройства УП FPS	S_9	Отказ устройства УСО47

При экспоненциальном распределении вероятности безотказной работы блоков УЭП вероятности нахождения системы в S_i -м ТС определяются соотношениями [4]

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

Выберем два непрерывных ДП — pr_1 (температура) и pr_2 (напряжение) — и дискретный восьмиразрядный ДП — pr_3 (табл. 3).

Таблица 3

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	0	1	0

Вероятности ошибок 1-го и 2-го рода представлены в табл. 4.

Таблица 4

Проверка	α_j	β_j
π_1	0,06	0,08
π_2	0,02	0,07
π_3	0,01	0,05

Байесовская сеть доверия для стойки УЭП показана на рис. 2.

1-й шаг синтеза оптимальной по достоверности стратегии диагностирования (п. 2 методики), представленный в программных средах GeNie и Hugin Expert, продемонстрирован на рис. 3: a — при отсутствии свидетельств, $b, в$ — при поступлении их (апостериорный вывод) после проведения проверки π_1 .

На рис. 4, $a, б$ соответственно представлены схемы оптимальных по достоверности стратегий диагностирования для моментов начала диагностирования $t_d = 2$ ч и $t_d = 40\,000$ ч, полученные в результате применения разработанной методики.

Сравним среднюю достоверность синтезированной стратегии диагностирования со средней достоверностью безусловной стратегии [4], которая представляет собой одновременную неупорядоченную проверку при начальной неопределенности всех диагностических признаков. Результатом диагностирования по безусловной стратегии является вид технического

состояния, наблюдаемый во всех исходах проверок. Для стойки УЭП при $t_d = 40\,000$ ч средняя достоверность безусловной (\bar{D}_6) и оптимальной ($\bar{D}(\text{STR}^*)$) стратегий равны

$$\bar{D}_6 = 0,868, \bar{D}(\text{STR}^*) = 0,964. \quad (2)$$

В результате сравнения получаем повышение достоверности на 11 %.

При рассмотрении непрерывных диагностических признаков обычно используется равномерный закон распределения их значений внутри интервалов [4], использование же других законов распределения, в частности нормального, также может быть обоснованно и целесообразно. Например, на границах интервала может наблюдаться наибольшая неопределенность между состояниями, а в середине интервалов данная неопределенность будет минимальна. На рис. 5 а, б соответственно показаны распределения значений непрерывных ДП pr_1 и pr_2 с учетом нормального закона.

Схемы оптимальных по достоверности стратегий диагностирования при равномерном (а) и нормальном (б) законах распределения значений непрерывных диагностических признаков представлены на рис. 6.

Результаты расчетов (см. рис. 6) свидетельствуют о необходимости обоснованного выбора вида распределения значений непрерывных диагностических признаков, так как это влияет на состав и последовательность проверок синтезированной стратегии.

Заключение. Разработанная методика позволяет синтезировать оптимальные по достоверности стратегии диагностирования АСУ сложными объектами на основе апостериорного вывода в байесовских сетях доверия с учетом динамики априорной информации и различных законов распределения диагностических признаков, что расширяет рамки применимости методического аппарата и повышает качество исследований по проблемам диагностики сложных технических объектов.

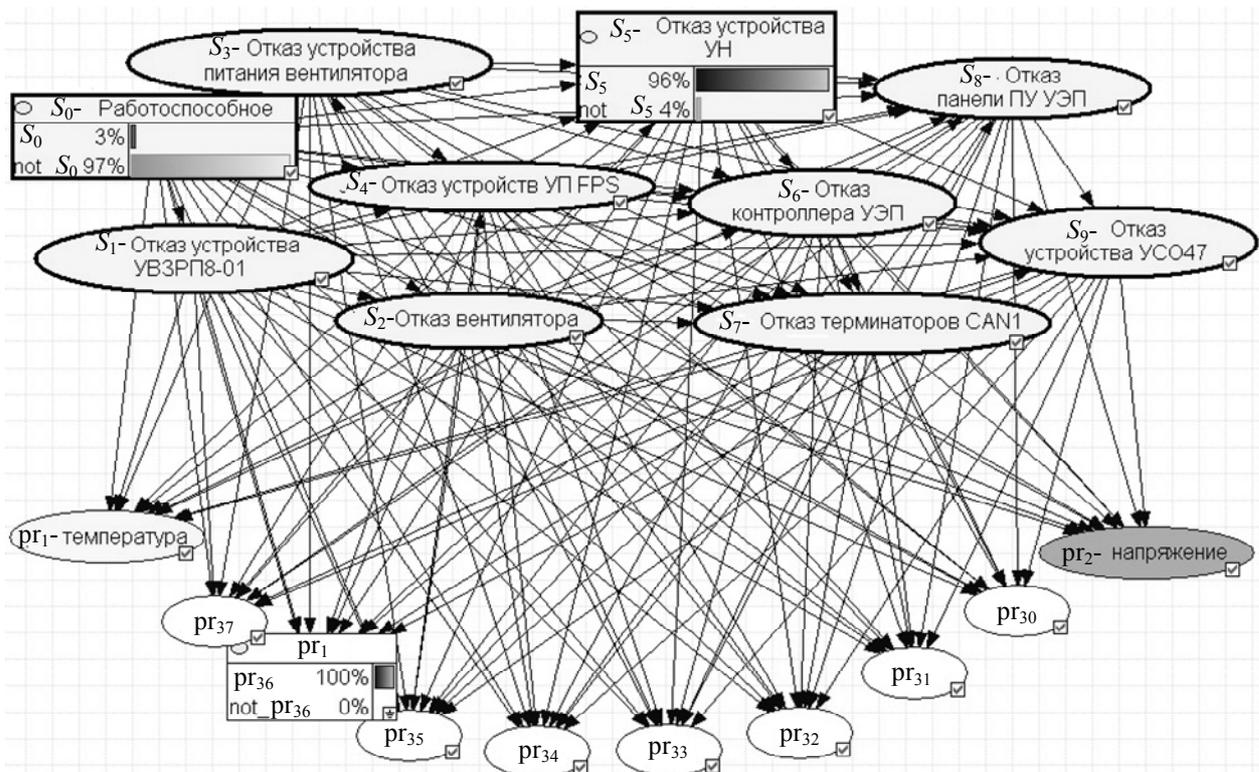


Рис. 2

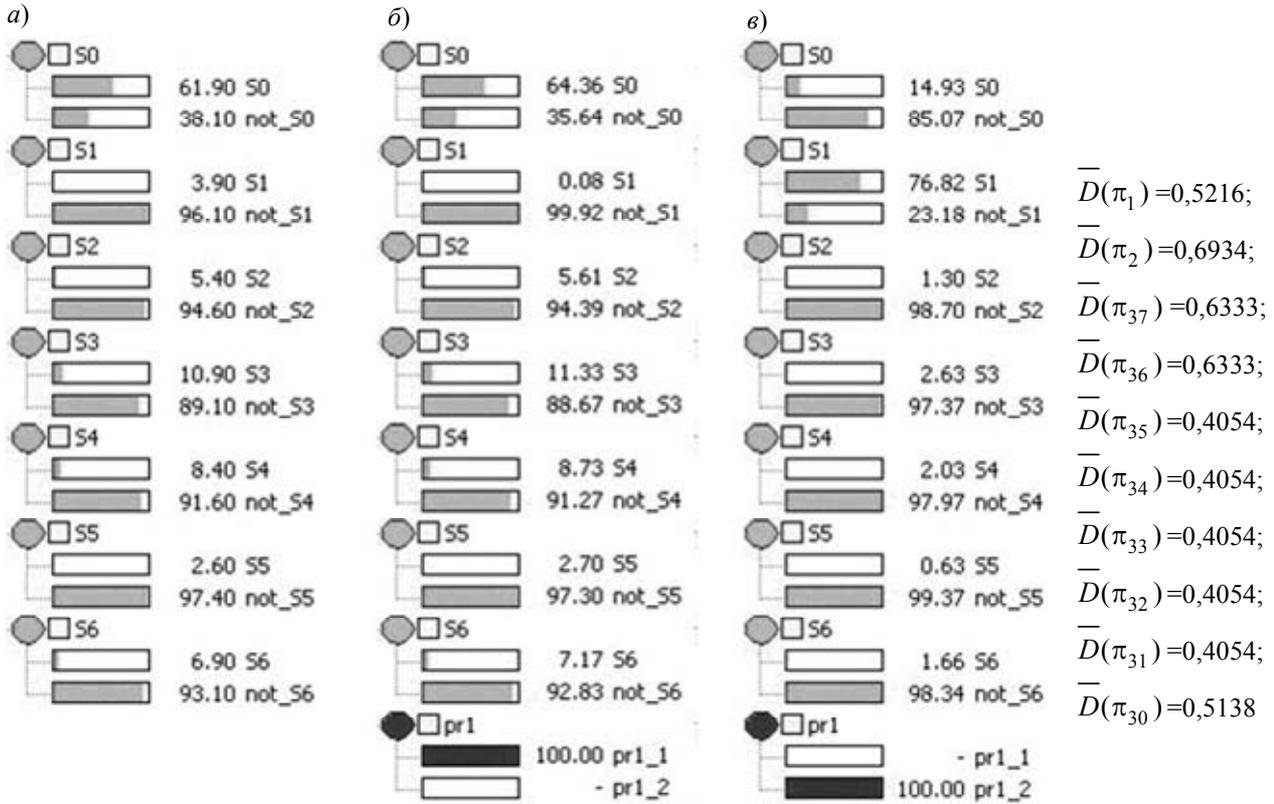


Рис. 3

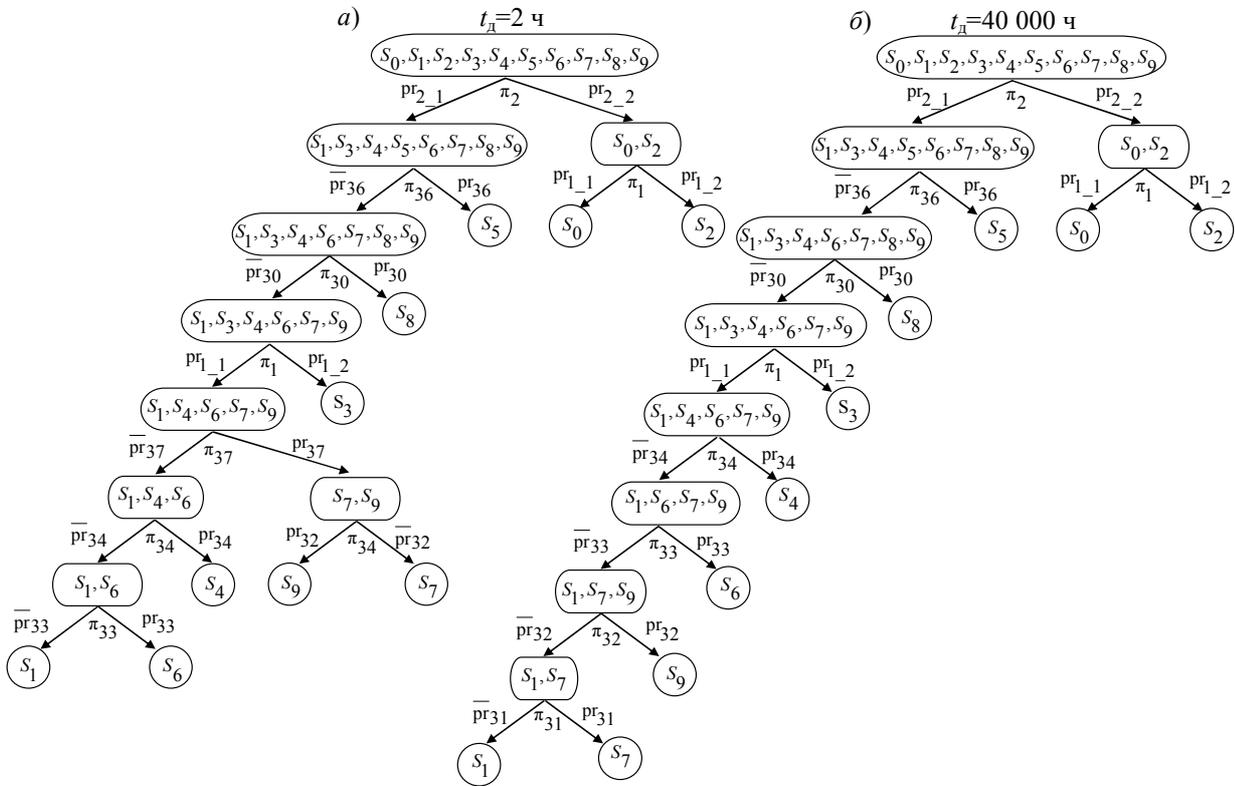


Рис. 4

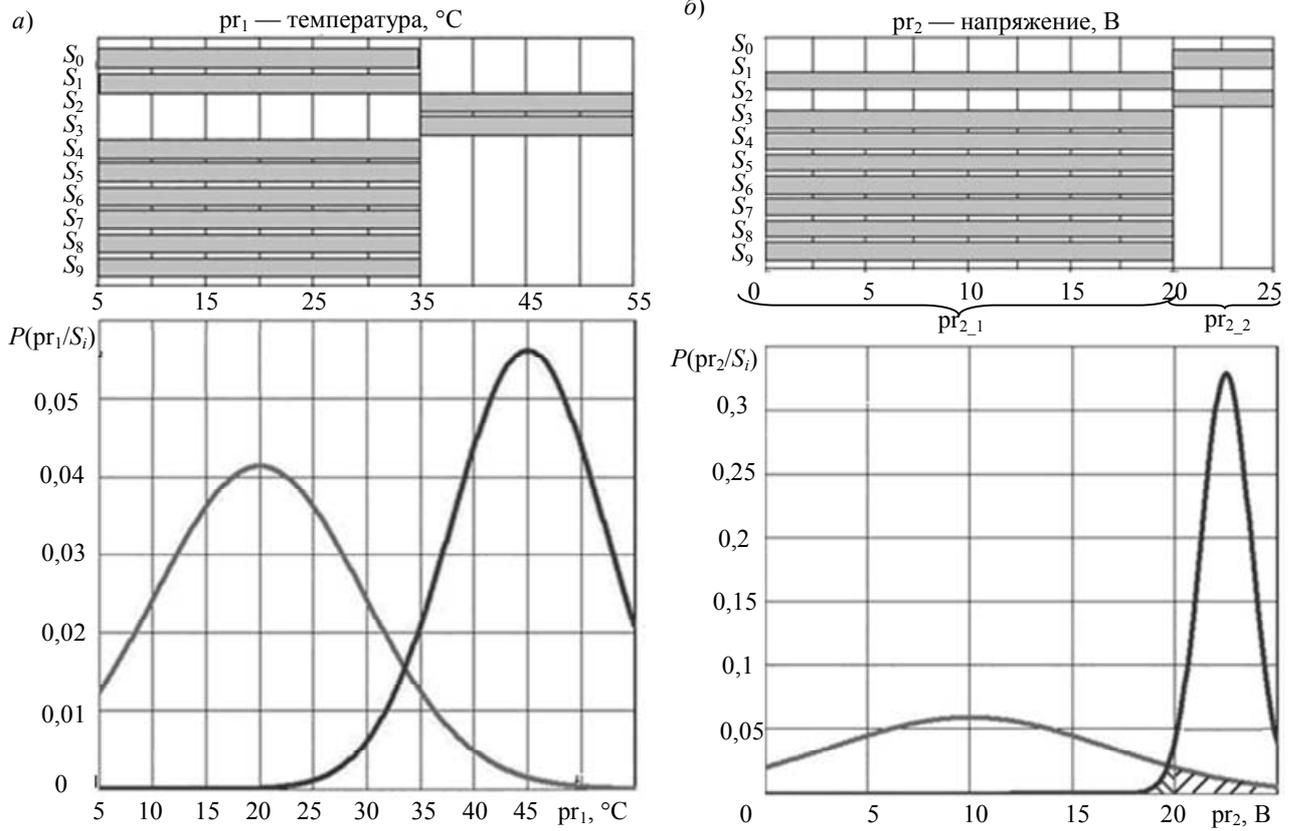


Рис. 5

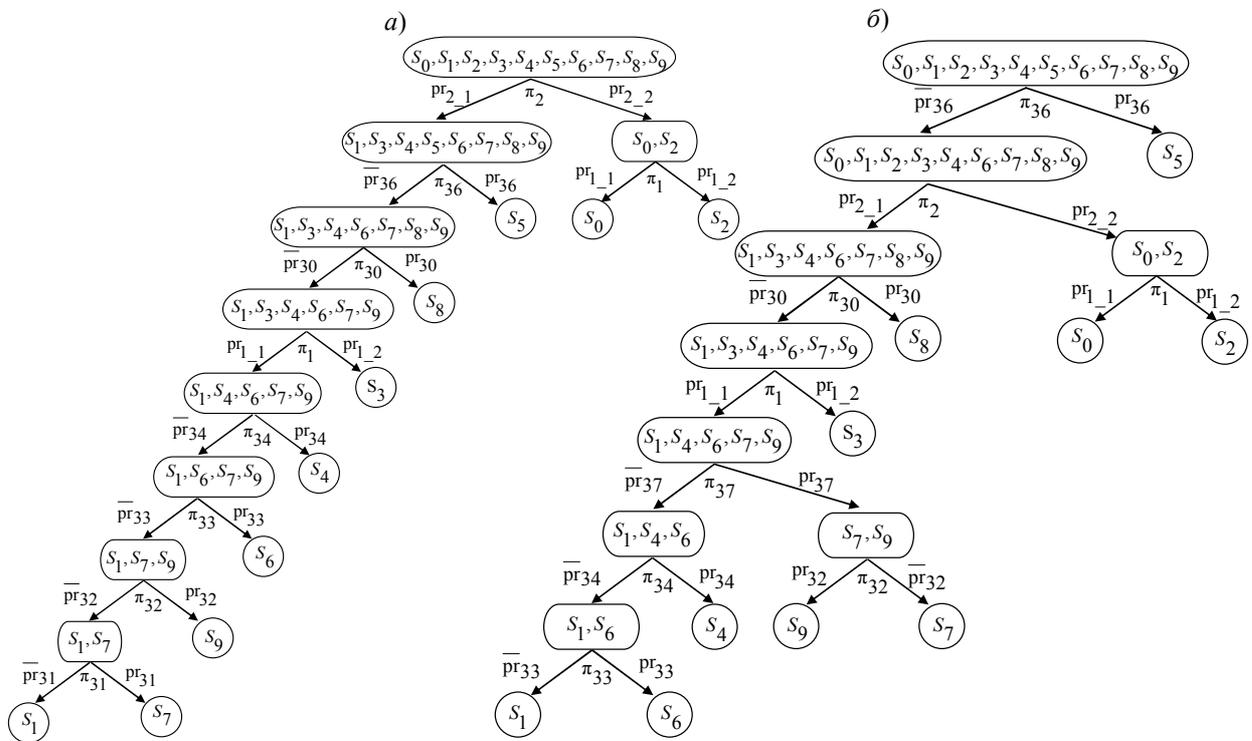


Рис. 6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тудупьев А. Л., Николенко С. И., Сироткин А. В.* Байесовские сети: логико-вероятностный подход. СПб: Наука, 2006. 607 с.
2. *Хедли Дж.* Нелинейное и динамическое программирование: Пер. с англ. М.: Мир, 1967. 507 с.
3. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2006. 1408 с.
4. *Дмитриев А. К., Юсупов Р. М.* Идентификация и техническая диагностика. МО СССР, 1987. 521 с.

Сведения об авторах

- Александр Борисович Кузнецов** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Санкт-Петербург;
E-mail: alexandr_k_spb@mail.ru
- Никита Алексеевич Осипов** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Санкт-Петербург;
E-mail: bayes@mail.ru
- Игорь Владимирович Дорожко** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Санкт-Петербург;
E-mail: Doroghko-Igor@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
автоматизированных систем
подготовки и пуска ракет
космического назначения

Поступила в редакцию
04.04.12 г.