

Научная статья

УДК 681.5

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181885>

МОДЕЛЬ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Игорь Владимирович Дорожко¹, Анатолий Сергеевич, Мусиенко²✉

^{1,2}Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

²vka@mil.ru ✉

Аннотация. В статье предложено применение моделей искусственного интеллекта – байесовских сетей – для расчета и мониторинга надежности сложных технических устройств, имеющих в своем составе схемы с различными типами резервирования: нагруженное и ненагруженное (в котором резервный элемент включается после отказа основного с помощью переключателя). В отличие от классического подхода к расчету надежности систем предложенное применение байесовских сетей позволяет учитывать поступление новой информации об отказах элементов, осуществлять поиск причин отказа всей системы. Кроме учета ошибочного срабатывания и отказа переключателя, есть возможность также учитывать временную задержку срабатывания переключателя. Приводится пример расчета и мониторинга надежности системы управления движением космического аппарата. Предлагаемый

подход может быть использован на этапах проектирования систем космического аппарата, для обоснования требований технических заданий, а также в процессе эксплуатации космических аппаратов для решения задач планирования, прогнозирования и т.п.

Ключевые слова: надежность, ненагруженный резерв, переключатель, байесовская сеть, мониторинг, космический аппарат

Для цитирования: Дорожко И.В., Мусиенко А.С. Модель мониторинга технического состояния сложных устройств с применением искусственного интеллекта // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181885>

Original article

A MODEL FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF COMPLEX DEVICES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Igor V. Dorozhko¹, Anatoly S. Musienko²✉

^{1,2}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,
Saint-Petersburg, Russia

²vka@mil.ru✉

Abstract. As of today, various backing-up methods, such as general, partial, constant, stand-by, moving, loaded, hot standby, cold stanby etc., are being employed for complex engineering devices reliability enhancing. Backing-up is one of the main ways for reliability

ensuring the space-rocket technology. General and separate hot redundancy herewith is being widely employed for ground equipment, with this tripling and the “2 out of 3” majority schemes are being applied. Doubling with cold redundancy application is characteristic of the spacecraft onboard device, which is being associated with weight-and-size limitations. Switching to the stand-by element occurs at the main one failure automatically by the switches or on command from the ground based control complexes.

The article proposes application of the artificial intelligence models, namely Bayesian networks, for the reliability computing and monitoring of complex engineering devices with circuits of various types of redundancy as their part. In contrast to the classical approach to the systems reliability computing, the proposed application of Bayesian networks allows accounting for the new data entry on the elements failures, accomplishing the search for the failure causes of the entire system, which is necessary for solving the tasks of technical condition monitoring during operation. For the objects, in which cold redundancy is being realized, models that make provisions for the switch erroneous actuation and failure, as well as account for the time delay of the switch actuation, are proposed. The article gives the example of reliability computing and monitoring the of the spacecraft motion control system.

The novelty of the presented work consists in the following:

- the authors proposed a new approach to computing reliability indicators of complex technical devices with Bayesian trust networks;

- the article proposed determining the elements and the whole system dynamic types by accounting for the temporal logic, i.e. application of logical-and-probabilistic links and inference with account for the time instants;
- examples of Bayesian network models for computing schemes with various types of redundancy are considered;
- the possibility of accounting for the erroneous operation and failure of switches, as well the switching time delay, is demonstrated. In addition a comparative analysis of the computation results and graphs of the trouble-free operation probability of the systems with “ideal” and “non-ideal” switches is presented.

The proposed approach may be applied at the design stages of spacecraft subsystems, to substantiate the requirements of technical specifications, as well as a of a spacecraft operation to ensure an operational search for the cause of failure and decision taking in case of emergencies.

Keywords: dependability, cold reserve, switching element, Bayesian network, monitoring, spacecraft

For citation: Dorozhko I.V., Musienko A.S. A model for monitoring the technical condition of complex using artificial intelligence. *Trudy MAI*, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181885>

Введение

В настоящее время для повышения надежности сложных технических устройств и систем широко применяются различные способы резервирования: общее,

раздельное, постоянное, с замещением, скользящее, нагруженное, ненагруженное и т.д. [1-4]. Резервирование является одним из основных способов обеспечения надежности ракетно-космической техники. При этом для наземного оборудования широко применяется общее и раздельное нагруженное резервирование, например, в автоматизированной системе управления технологическим оборудованием стартового комплекса (АСУ ТО СК) «Союз-2» и автоматизированной системе подготовки ракет-носителей (разгонных блоков) (АСУП РН (РБ)) «Ангара» используются троирование и мажоритарные схемы «2 из 3». Для бортовой аппаратуры ракет-носителей и космических аппаратов характерным является применение дублирования с ненагруженным резервированием, что связано с массогабаритными ограничениями [5-14]. Переключение на резервный элемент происходит при отказе основного автоматически или по команде с наземных комплексов управления с помощью переключателей.

Вывод расчетных соотношений для анализа надежности базируется на статических и динамических моделях, в которых применяются основные формулы теории вероятностей (вероятность суммы и произведения событий, формула полной вероятности), а также аппарат марковских случайных процессов. Однако, в данных моделях не учитывается поступление информации об отказах элементов.

В статье предлагается применение аппарата байесовских сетей [15-19] для расчета надежности систем с различными типами резервирования. Байесовские сети (алгебраические байесовские сети и байесовские сети доверия) являются вероятностными графическими моделями искусственного интеллекта. В рамках

данной статьи рассматриваются байесовские сети доверия, которые представляют собой ациклический направленный граф с тензорами условных вероятностей в узлах.

Байесовские сети доверия обладают рядом преимуществ, среди которых основным является возможность объединения априорных (начальных) знаний об объекте с новыми (экспериментальными) данными для получения апостериорной (послеопытной) оценки.

Рассмотрим возможности байесовских сетей для расчета надежности систем различными типами резервирования на примере бортовой аппаратуры (БА) системы управления движением (СУД) космического аппарата (КА). Структурная схема надежности СУД КА представлена на рис. 1 [20].

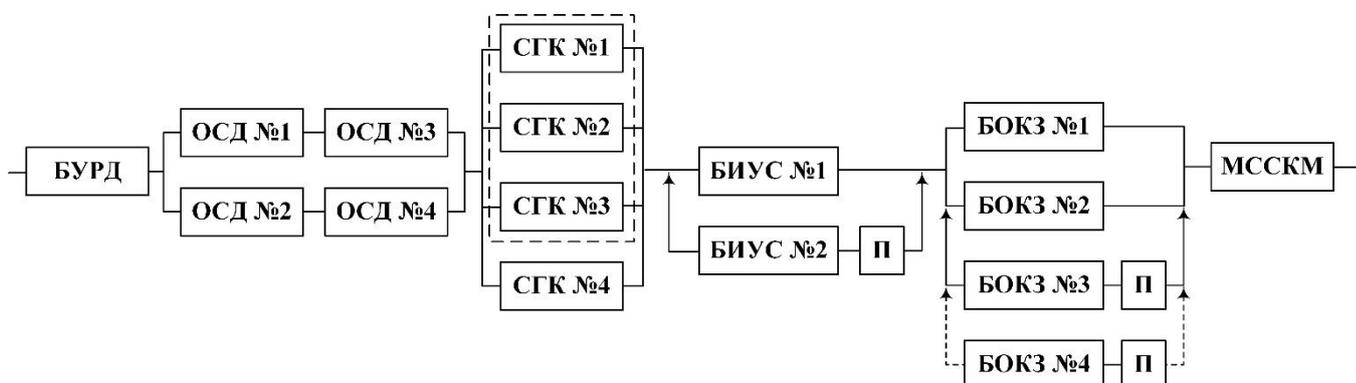


Рис. 1. Структурно-логическая схема надежности системы с двумя блоками, соединенными параллельно

В состав БА СУД КА входят:

- блок управления ракетными двигателями (БУРД);
- четыре оптических солнечных датчика (ОСД);
- четыре силовых гироскопических комплекса (СГК);
- два блока измерителей угловой скорости (БИУС);

- четыре блока определения координат звезд (БОКЗ);
- магнитная система сброса кинетического момента (МССКМ).

Анализ структурной схемы надежности (рис. 1) показывает, что в СУД КА предусмотрены различные виды резервирования.

Модели байесовской сети для расчета надежности системы с нагруженным резервированием

Оптические солнечные датчики (ОСД) СУД КА представляют собой сочетание последовательного и параллельного соединения (рис. 1 и рис. 2). ОСД работают в нагруженном режиме попарно (первый – с третьим, второй – с четвертым).

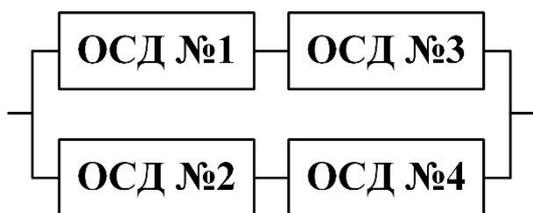


Рис. 2. Структурно-логическая схема надежности ОСД

Расчет надежности данной системы производится по известным формулам для последовательного и параллельного соединения:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Rabot}_{\text{ОСД}}) &= 1 - (1 - P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Rabot}_3)) \cdot (1 - P(\text{Rabot}_2) \cdot P(\text{Rabot}_4)) = \\
 &= 1 - (1 - 0,9 \cdot 0,9)^2 = 0,9639.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Фрагмент структурно-логической схемы (СЛС) надежности, изображенной на рис. 2, можно представить в виде байесовской сети доверия (БСД), показанной на рис. 3 в бесплатной с открытым кодом среде [GeNie](#) [21].

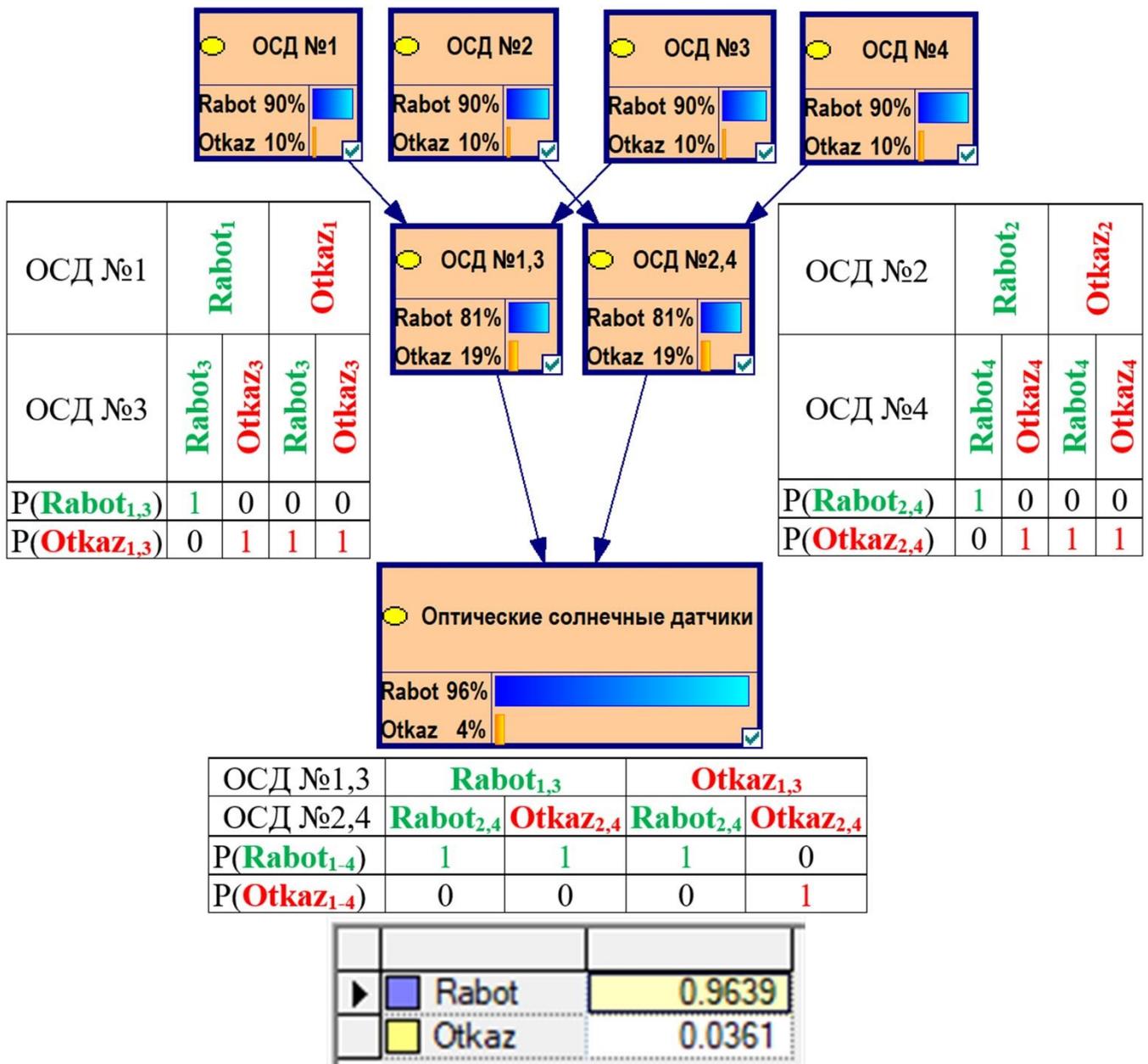


Рис. 3. Байесовская сеть, моделирующая надежность системы оптических солнечных датчиков

Как видно из рис. 3, для вершин байесовской сети «OSD №1,3» и «OSD №1,4» задается набор условных вероятностей, «кодирующих» последовательное соединение, т.е. отказ всей системы происходит при отказе одного из OSD, а для вершины «Оптические солнечные датчики» задается набор условных вероятностей, «кодирующих» параллельное соединение [20, 22, 23], т.е. система сохраняет работоспособность даже при отказе одного из наборов OSD №1,3 или OSD №2,4.

Вероятность безотказной работы (ВБР) набора «ОСД №1,3» вычисляется исходя из значений безусловных и условных вероятностей по следующему соотношению:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Rabot}_{1,3}) &= P(\text{Rabot}_{1,3} / \text{Rabot}_1, \text{Rabot}_3) \cdot P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Rabot}_3) + \\
 &+ P(\text{Rabot}_{1,3} / \text{Rabot}_1, \text{Otkaz}_3) \cdot P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Otkaz}_3) + \\
 &+ P(\text{Rabot}_{1,3} / \text{Otkaz}_1, \text{Rabot}_3) \cdot P(\text{Otkaz}_1) \cdot P(\text{Rabot}_3) + \\
 &+ P(\text{Rabot}_{1,3} / \text{Otkaz}_1, \text{Otkaz}_3) \cdot P(\text{Otkaz}_1) \cdot P(\text{Otkaz}_3) = \\
 &= 1 \cdot 0,9 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,9 \cdot 0,1 + 0 \cdot 0,1 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,1 \cdot 0,1 = 0,81.
 \end{aligned}$$

Аналогично, вычисляется ВБР для набора «ОСД №2,4».

Для вычисления ВБР всей системы оптических солнечных датчиков необходимо использовать вычисленные ВБР наборов «ОСД №1,3» и «ОСД №2,4», а также набор условных вероятностей, «кодирующих» параллельное соединение:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Rabot}_{1,4}) &= P(\text{Rabot}_{1,4} / \text{Rabot}_{1,3}, \text{Rabot}_{2,4}) \cdot P(\text{Rabot}_{1,3}) \cdot P(\text{Rabot}_{2,4}) + \\
 &+ P(\text{Rabot}_{1,4} / \text{Rabot}_{1,3}, \text{Otkaz}_{2,4}) \cdot P(\text{Rabot}_{1,3}) \cdot P(\text{Otkaz}_{2,4}) + \\
 &+ P(\text{Rabot}_{1,4} / \text{Otkaz}_{1,3}, \text{Rabot}_{2,4}) \cdot P(\text{Otkaz}_{1,3}) \cdot P(\text{Rabot}_{2,4}) + \\
 &+ P(\text{Rabot}_{1,4} / \text{Otkaz}_{1,3}, \text{Otkaz}_{2,4}) \cdot P(\text{Otkaz}_{1,3}) \cdot P(\text{Otkaz}_{2,4}) = \\
 &= 1 \cdot 0,81 \cdot 0,81 + 1 \cdot 0,81 \cdot 0,19 + 1 \cdot 0,19 \cdot 0,81 + 0 \cdot 0,19 \cdot 0,19 = 0,9639.
 \end{aligned}$$

На рис. 4 представлен результат апостериорного вывода в БСД при поступлении информации об отказе ОСД №3. В данном случае очевидно, что отказ «ОСД №3» приведет к отказу набора «ОСД №1,3» и, следовательно, работоспособность всей системы «Оптические солнечные датчики» будет зависеть от набора «ОСД №2,4» (рис. 4).

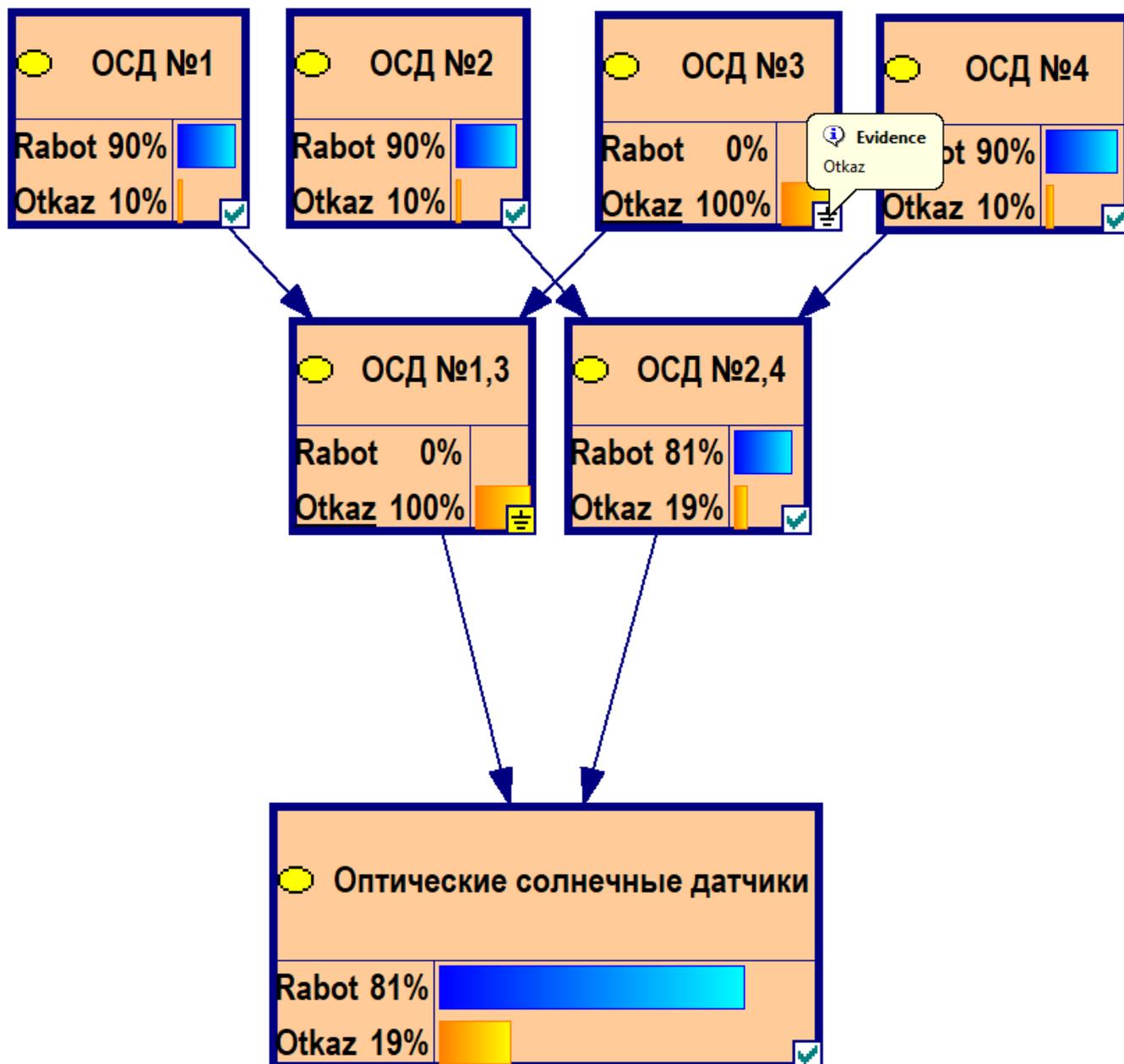


Рис. 4. Апостериорный вывод в модели БСД при поступлении информации об отказе ОСД №3

Кроме ОСД в БА СУД КА нагруженное резервирование реализовано в системе из четырех силовых гироскопических комплекса, соединенных по схеме «3 из 4» (рис. 1 и рис. 5).

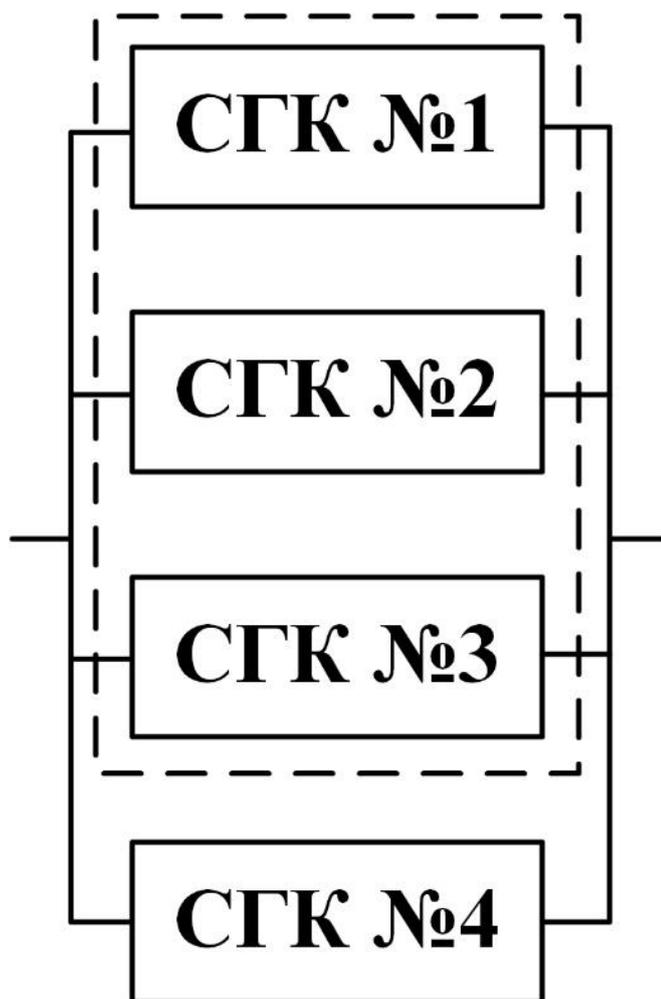
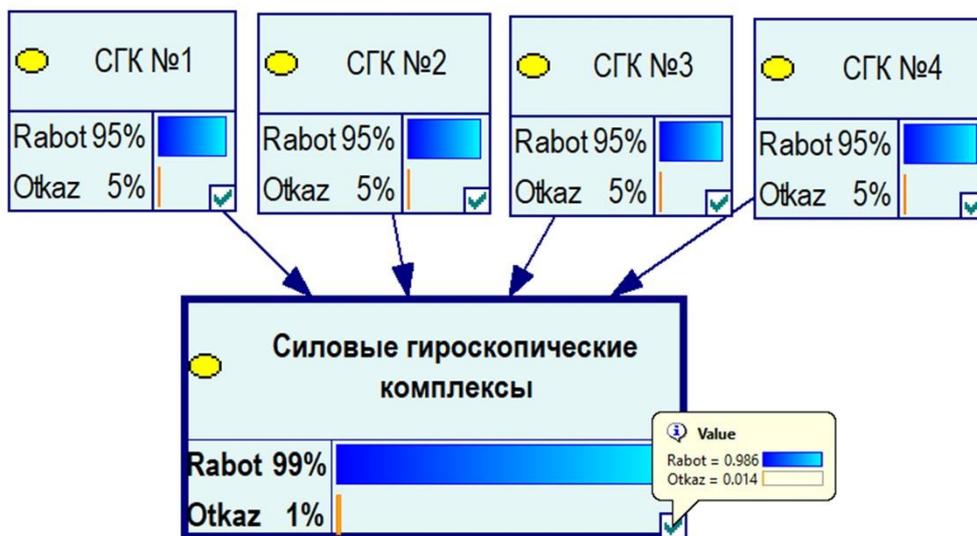


Рис. 5. Структурно-логическая схема надежности СГК

На рис. 6 представлен фрагмент структурно-логической схемы (СЛС) надежности, изображенной на рис. 5.

Для вычисления ВБР всей системы СГК:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Rabot}_{\text{СГК}}) &= P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Rabot}_1, \text{Rabot}_2, \text{Rabot}_3, \text{Rabot}_4) \cdot P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Rabot}_2) \cdot P(\text{Rabot}_3) \cdot P(\text{Rabot}_4) \\
 &+ P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Rabot}_1, \text{Rabot}_2, \text{Rabot}_3, \text{Otkaz}_4) \cdot P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Rabot}_2) \cdot P(\text{Rabot}_3) \cdot P(\text{Otkaz}_4) + \\
 &+ P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Rabot}_1, \text{Rabot}_2, \text{Otkaz}_3, \text{Rabot}_4) \cdot P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Rabot}_2) \cdot P(\text{Otkaz}_3) \cdot P(\text{Rabot}_4) + \\
 &+ P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Rabot}_1, \text{Otkaz}_2, \text{Rabot}_3, \text{Rabot}_4) \cdot P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Otkaz}_2) \cdot P(\text{Rabot}_3) \cdot P(\text{Rabot}_4) + \\
 &+ P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Otkaz}_1, \text{Rabot}_2, \text{Rabot}_3, \text{Rabot}_4) \cdot P(\text{Otkaz}_1) \cdot P(\text{Rabot}_2) \cdot P(\text{Rabot}_3) \cdot P(\text{Rabot}_4) = \\
 &= 1 \cdot 0,95^4 + 4 \cdot 1 \cdot 0,95^3 \cdot 0,05 \approx 0,986
 \end{aligned}$$



CGK №1	Rabot ₁								Otkaz ₁							
CGK №2	Rabot ₂				Otkaz ₂				Rabot ₂				Otkaz ₂			
CGK №3	Rabot ₃		Otkaz ₃													
CGK №4	Rabot ₄	Otkaz ₄														
P(Rabot _{CGK})	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P(Otkaz _{CGK})	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1

▶	Rabot	0.98598125
	Otkaz	0.01401875

Рис. 6. Байесовская сеть, моделирующая надежность системы оптических солнечных датчиков

На рис. 7 представлены результаты апостериорного вывода в БСД при последовательном поступлении информации об отказах CGK №2 (рис. 7а) и CGK №4 (рис. 7б).

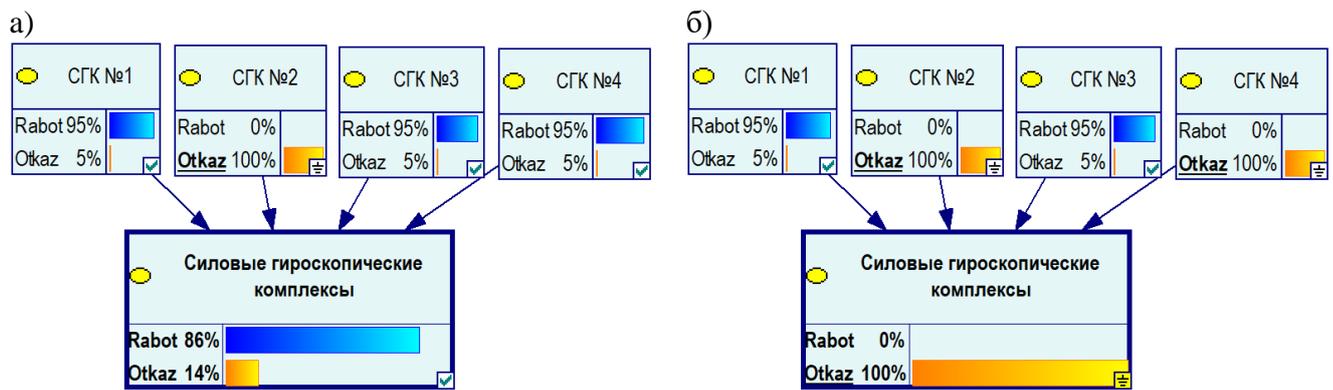


Рис. 7. Примеры апостериорного вывода в байесовской сети при поступлении информации: а) об отказе СГК №2; б) об отказах СГК №2 и СГК №4

На рис. 7а представлен результат апостериорного вывода в БСД при поступлении информации об отказе СГК №2. Для осуществления апостериорного (логико-вероятностного) вывода [15-23] необходимо приравнять к нулю вероятности исходов, несовместимые с поступившей новой информацией: в данном случае приравниваются к нулю условные вероятности работоспособного состояния всей системы СГК при работоспособности блока СГК №2, а именно:

$$P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Rabot}_1, \text{Rabot}_2, \text{Rabot}_3, \text{Rabot}_4) = P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Rabot}_1, \text{Rabot}_2, \text{Rabot}_3, \text{Otkaz}_4) = \\ = P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Rabot}_1, \text{Rabot}_2, \text{Otkaz}_3, \text{Rabot}_4) = P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Otkaz}_1, \text{Rabot}_2, \text{Rabot}_3, \text{Rabot}_4) = 0.$$

Вероятности оставшихся исходов нормируем с учетом значений априорных вероятностей:

$$P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Otkaz}_2) = P(\text{Rabot}_{\text{СГК}} / \text{Rabot}_1, \text{Otkaz}_2, \text{Rabot}_3, \text{Rabot}_4) \cdot P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Rabot}_3) \times \\ \times P(\text{Rabot}_4) = 1 \cdot 0,95^3 \approx 0,86.$$

Соответственно, при отказе двух СГК №2 и СГК №4 (рис. 7б) вся система СГК перестает работать.

Кроме того, для учета изменения ВБР в течение времени можно применить модель динамической байесовской сети [15-23]. Соответственно, для вершин, соответствующих блокам БА СУД КА задаются:

1) наборы вероятностей в начальный момент времени $P(\text{Rabot}_i)_{t=0} = 1$ и $P(\text{Otkaz}_i)_{t=0} = 0$, так как в начальный момент времени предполагаем, что все блоки (элементы) проверены и работоспособны;

2) наборы условных вероятностей, задающих динамику технических состояний во времени на основе априорных данных об интенсивностях отказов и восстановлений:

$$- P(\text{Rabot}_i(t)/\text{Rabot}_i(t-1)) = \frac{e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i(t-1)}} = e^{-\lambda_i};$$

$$- P(\text{Otkaz}_i(t)/\text{Rabot}_i(t-1)) = 1 - e^{-\lambda_i};$$

$$- P(\text{Rabot}_i(t)/\text{Otkaz}_i(t-1)) = 1 - e^{-\mu_i};$$

$$- P(\text{Otkaz}_i(t)/\text{Otkaz}_i(t-1)) = e^{-\mu_i}.$$

Например, для ОСД №1-4 задаются (рис. 8):

- $P(\text{Rabot}_1(t)/\text{Rabot}_1(t-1)) = 0,9999$ (вероятность работоспособности блока в текущий момент времени, при условии, что он был работоспособен в предыдущий момент времени);

- $P(\text{Otkaz}_1(t)/\text{Rabot}_1(t-1)) = 0,0001$ (вероятность отказа блока в текущий момент времени, при условии, что он был работоспособен в предыдущий момент времени);

$$- P(\text{Rabot}_1(t)/\text{Otkaz}_1(t-1)) = 0 \text{ (так как элемент не восстанавливаемый);}$$

$$- P(\text{Otkaz}_1(t)/\text{Otkaz}_1(t-1)) = 1.$$

Тогда имеем следующие вычисления вероятностных распределений

для СГК №1 в динамической байесовской сети:

$$\begin{pmatrix} P(\text{Rabot}_1(t)) \\ P(\text{Otkaz}_1(t)) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} P(\text{Rabot}_1(t)/\text{Rabot}_1(t-1)) & P(\text{Rabot}_1(t)/\text{Otkaz}_1(t-1)) \\ P(\text{Otkaz}_1(t)/\text{Rabot}_1(t-1)) & P(\text{Otkaz}_1(t)/\text{Otkaz}_1(t-1)) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P(\text{Rabot}_1(t-1)) \\ P(\text{Otkaz}_1(t-1)) \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0,9999 & 0 \\ 0,0001 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P(\text{Rabot}_1(t-1)) \\ P(\text{Otkaz}_1(t-1)) \end{pmatrix};$$

$$P(\text{Rabot}_1(t)) = P(\text{Rabot}_1(t)/\text{Rabot}_1(t-1)) \cdot P(\text{Rabot}_1(t-1)) + P(\text{Rabot}_1(t)/\text{Otkaz}_1(t-1)) \times P(\text{Otkaz}_1(t-1));$$

$$P(\text{Otkaz}_1(t)) = P(\text{Otkaz}_1(t)/\text{Rabot}_1(t-1)) \cdot P(\text{Rabot}_1(t-1)) + P(\text{Otkaz}_1(t)/\text{Otkaz}_1(t-1)) \times P(\text{Otkaz}_1(t-1));$$

$$P(\text{Rabot}_1(1)) = 0,9999 \cdot 1 + 0 \cdot 0 = 0,9999;$$

$$P(\text{Otkaz}_1(1)) = 0,0001 \cdot 1 + 1 \cdot 0 = 0,0001;$$

$$P(\text{Rabot}_1(2)) = 0,9999 \cdot 0,9999 + 0 \cdot 0,0001 = 0,9998;$$

$$P(\text{Otkaz}_1(2)) = 0,0001 \cdot 0,9999 + 1 \cdot 0,0001 = 0,0002 \text{ и т.д.}$$

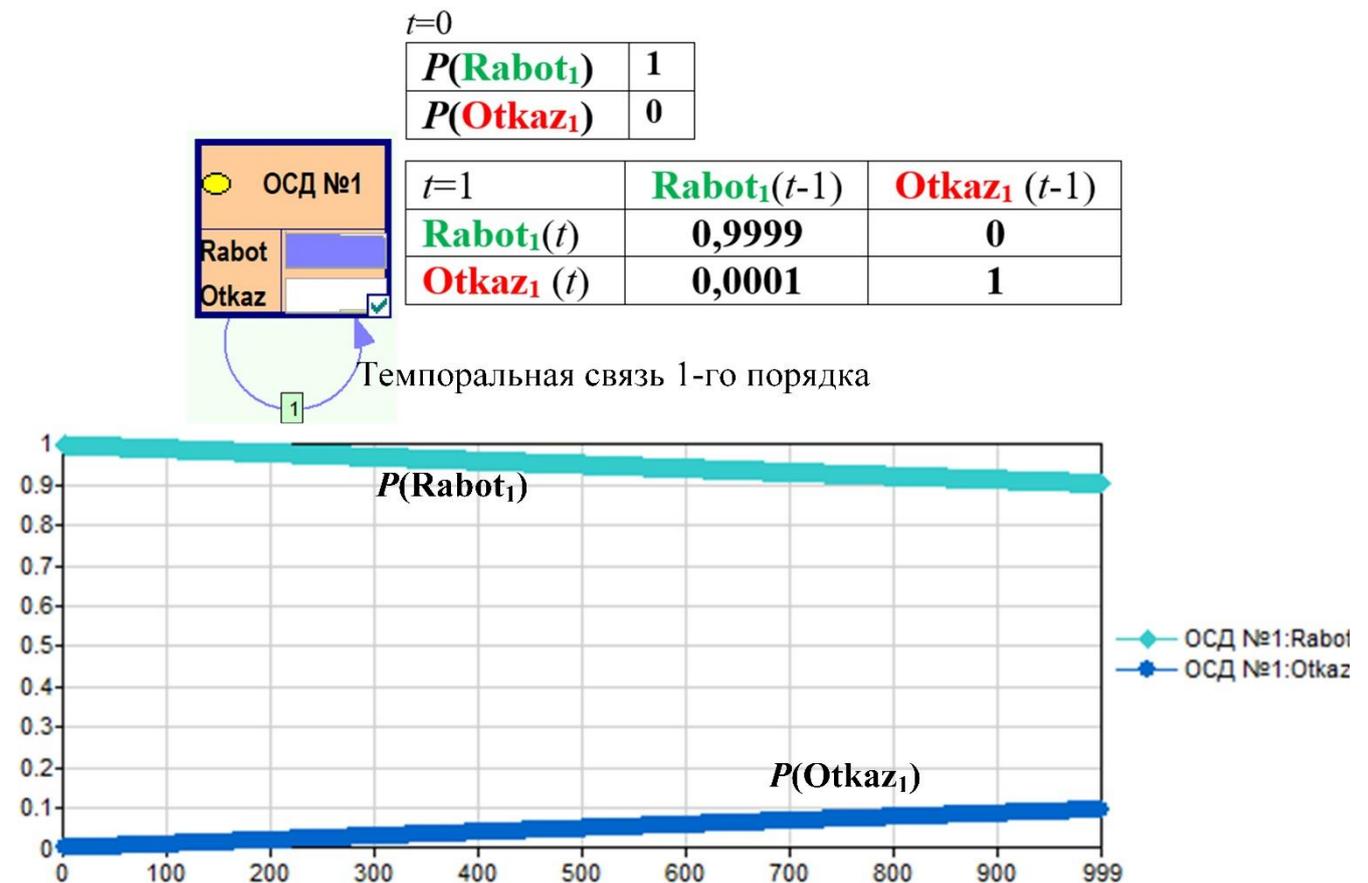


Рис. 8. Моделирование ОСД №1 динамической байесовской сетью

Тогда вся система «Оптические солнечные датчики» может быть представлена динамической байесовской сетью, в которой можно также еще и учитывать поступление новой информации с учетом времени (например, отказ одного из ОСД произошел спустя 240 часов). Таким образом, используя апостериорный вывод, можно корректировать значение вероятности безотказной работы различных соединений с учетом информации об отказах, входящих в них элементов.

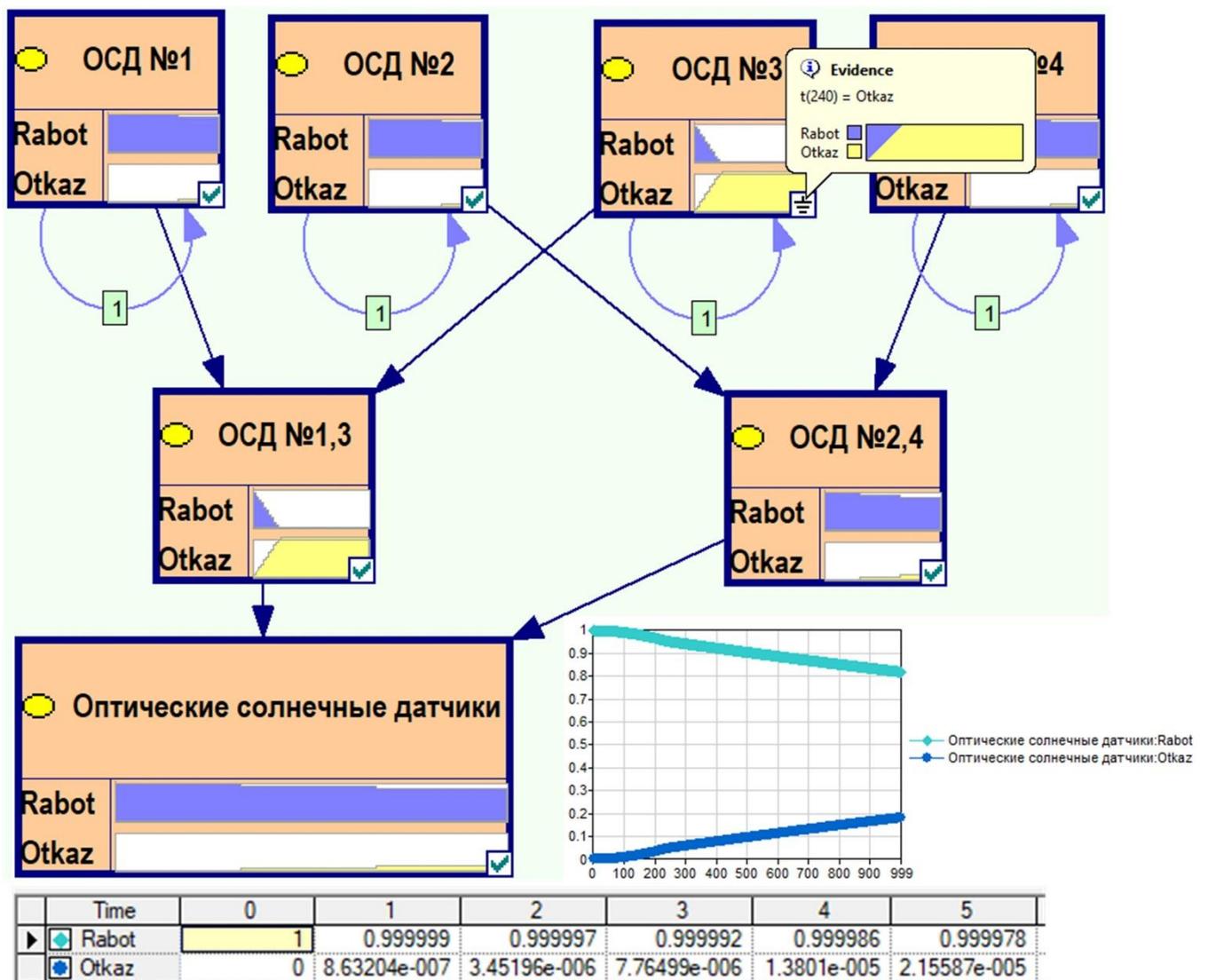


Рис. 9. Моделирование ОСД №1 динамической байесовской сетью

Модели байесовской сети для расчета надежности системы с ненагруженным резервированием

В БА СУД КА также реализовано ненагруженное резервирование для блоков измерителей угловой скорости (БИУС) и блоков определения координат звезд (БОКЗ). При отказе БИУС №1 происходит переключение на резервный БИУС №2, который до этого момента находится в выключенном состоянии.

Зададим априорную информацию о надежности блоков БИУС №1 и БИУС №2:

$$\begin{aligned}
 \lambda_{\text{БИУС}\#1} &= \lambda_{\text{БИУС}\#2} \approx 0,0001 \text{ ч}^{-1}, \mu_{\text{БИУС}\#1} = \mu_{\text{БИУС}\#2} = 0; \\
 P(\text{Rabot}_{\text{БИУС}\#1}(0)) &= P(\text{Rabot}_{\text{БИУС}\#2}(0)) = 1; \\
 P(\text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#1}(0)) &= P(\text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#2}(0)) = 0; \\
 P(\text{Rabot}_{\text{БИУС}\#1}(t) / \text{Rabot}_{\text{БИУС}\#1}(t-1)) &= 0,9999; \\
 P(\text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#1}(t) / \text{Rabot}_{\text{БИУС}\#1}(t-1)) &= 0,0001; \\
 P(\text{Rabot}_{\text{БИУС}\#1}(t) / \text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#1}(t-1)) &= 0; \\
 P(\text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#1}(t) / \text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#1}(t-1)) &= 1; \\
 P(\text{Rabot}_{\text{БИУС}\#2}(t) / \text{Srabotal}(t), \text{Rabot}_{\text{БИУС}\#2}(t-1)) &= 0,9999; \\
 P(\text{Rabot}_{\text{БИУС}\#2}(t) / \text{Srabotal}(t), \text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#2}(t-1)) &= 0; \\
 P(\text{Rabot}_{\text{БИУС}\#2}(t) / \text{Not_Srabotal}(t), \text{Rabot}_{\text{БИУС}\#2}(t-1)) &= 1; \\
 P(\text{Rabot}_{\text{БИУС}\#2}(t) / \text{Not_Srabotal}(t), \text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#2}(t-1)) &= 0; \\
 P(\text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#2}(t) / \text{Srabotal}(t), \text{Rabot}_{\text{БИУС}\#2}(t-1)) &= 0,0001; \\
 P(\text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#2}(t) / \text{Srabotal}(t), \text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#2}(t-1)) &= 1; \\
 P(\text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#2}(t) / \text{Not_Srabotal}(t), \text{Rabot}_{\text{БИУС}\#2}(t-1)) &= 0; \\
 P(\text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#2}(t) / \text{Not_Srabotal}(t), \text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#2}(t-1)) &= 1.
 \end{aligned}$$

Укажем наборы условных распределений для переключателя:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Srabotal} / \text{Rabot}_{\text{БИУС}\#1}) &= 0; \quad P(\text{Srabotal} / \text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#1}) = 1; \\
 P(\text{Not_Srabotal} / \text{Rabot}_{\text{БИУС}\#1}) &= 1; \quad P(\text{Not_Srabotal} / \text{Otkaz}_{\text{БИУС}\#1}) = 0.
 \end{aligned}$$

Для всего соединения блоков измерителей угловой скорости набор вероятностей представлен в табл. 1.

Набор условных вероятностей, задающих соединение блоков измерителей угловой скорости, представляющие собой ненагруженное резервирование

БИУС №1	Rabot ₁				Otkaz ₁			
Переключатель	Srabotal		Not_Srabotal		Srabotal		Not_Srabotal	
БИУС №2	Rabot ₂	Otkaz ₂						
P(Rabot _{БИУС})	1	0	1	1	1	0	0	0
P(Otkaz _{БИУС})	0	1	0	0	0	1	1	1

Используя данную априорную информацию, можно рассчитать вероятность безотказной работы всей системы блоков измерителей угловой скорости, например, на момент времени $t=700$ ч. Пример, модели байесовской сети для блоков измерителей угловой скорости представлен на рис. 10.

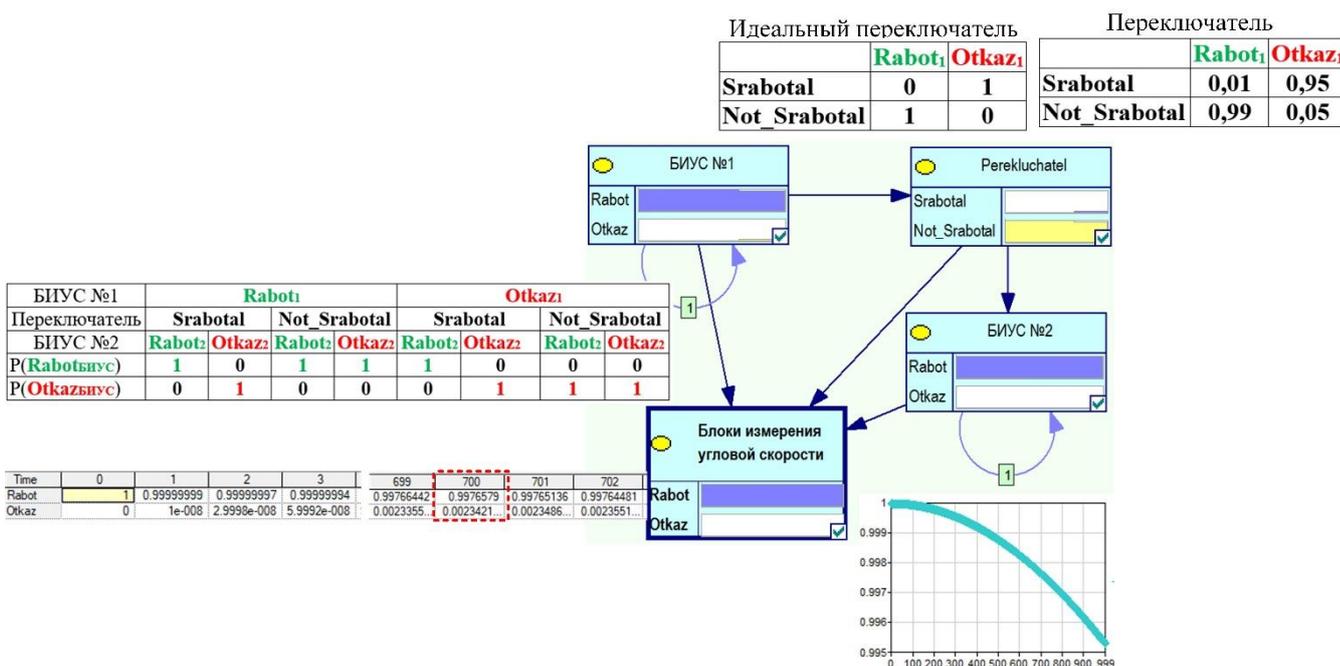


Рис. 10. Пример динамической байесовской сети для моделирования ненагруженного резервирования

При идеальном переключателе (абсолютно надежном), по классической формуле для резервирования с замещением найдем [24, 25]:

$$P(\text{Rabot}_{\text{БИУС}}(t = 700)) = e^{-\lambda_{\text{БИУС}\#1} \cdot t} + \int_0^t \lambda_{\text{БИУС}\#1} \cdot e^{-\lambda_{\text{БИУС}\#1} \cdot x} \cdot e^{-\lambda_{\text{БИУС}\#1} \cdot (t-x)} dx =$$

$$= e^{-\lambda_{\text{БИУС}\#1} \cdot t} \cdot (1 + \lambda_{\text{БИУС}\#1} \cdot t) = e^{-0,0001 \cdot 700} \cdot (1 + 0,0001 \cdot 700) \approx 0,9977.$$
(2)

Таким образом, результаты расчетов с помощью байесовской сети и по классическим формулам совпадают, что позволяет использовать аппарат байесовских сетей для моделирования соединений с ненагруженным резервированием.

При этом есть возможность учета (рис. 11):

1. Надежности переключателя, т.е. можно моделировать события:

- когда переключатель не сработал при отказе основного блока;
- ошибочного срабатывания переключателя, когда основной блок не отказал, но переключение на резерв произошло.

2. Задержки переключателя, т.е. переключение происходит спустя некоторое время, для этого в модели необходимо будет использовать темпоральную связь.

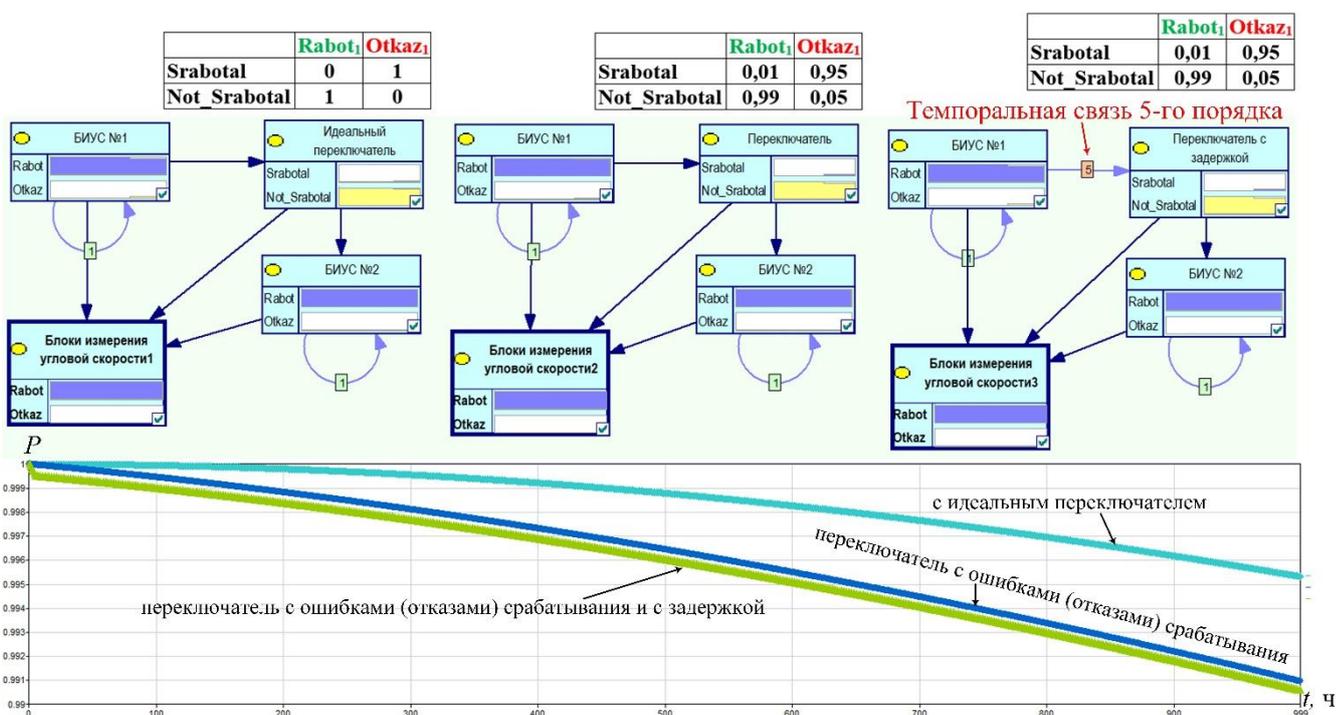


Рис. 11. Варианты использования различных переключателей: идеального, с отказами (ошибками) и с задержкой

При поступлении информации об отказе БИУС №1, например, в момент времени 200 часов, можно также учесть данную информацию, обновив, байесовскую сеть получить уточненное значение ВБР для данного соединения (рис. 12).

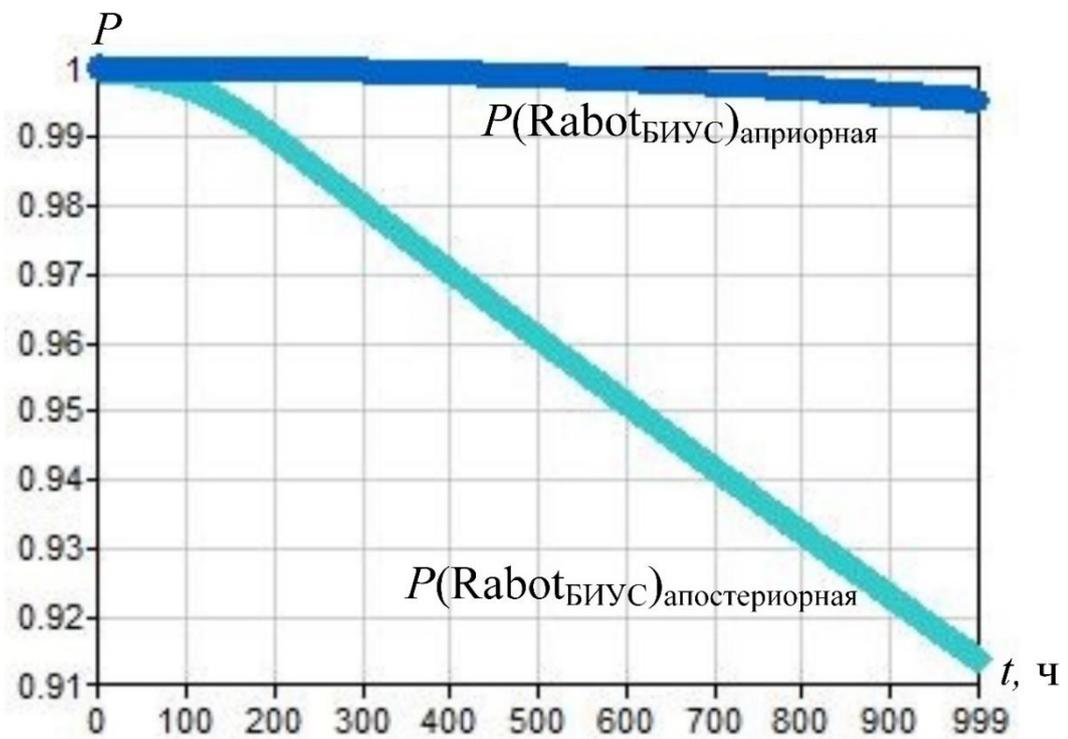
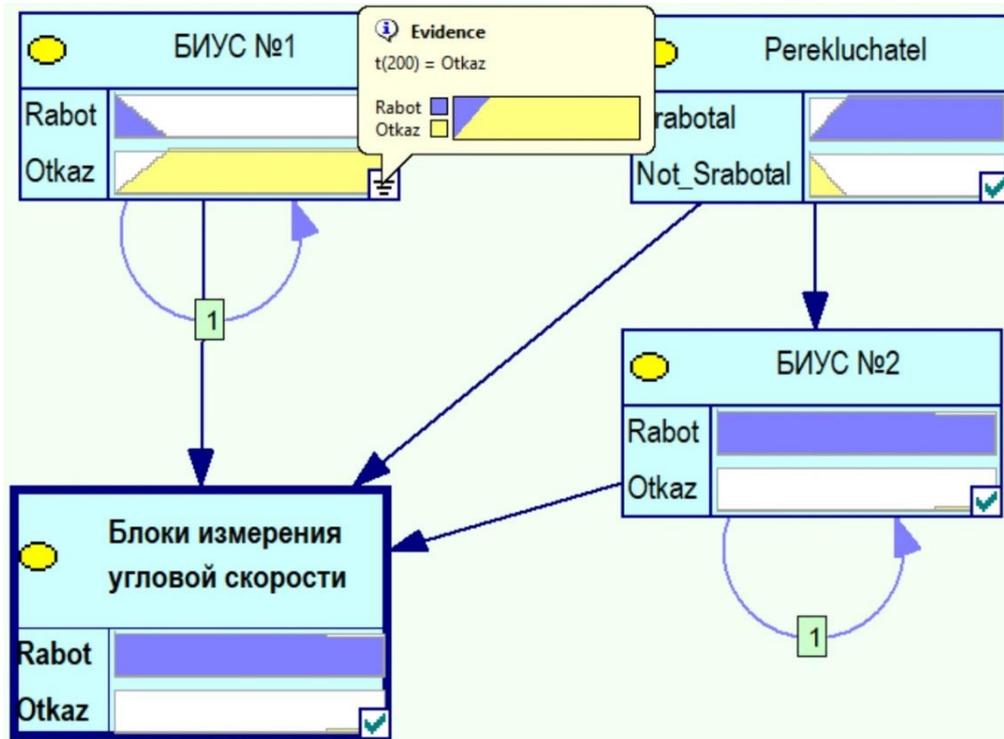


Рис. 12. Пример ДБСД после получения информации об отказе БИУС №1 в момент времени $t=200$ ч

В соответствии с логикой управления СУД КА результаты измерений используются с двух БОКЗ. БОКЗ №1 и БОКЗ №2 реализуют нагруженное резервирование, при этом БОКЗ №3 и БОКЗ №4 находятся в ненагруженном резерве и могут заменить любой отказавший блок (рис. 1). Аналогично для БОКЗ можно построить модель динамической байесовской сети с двумя переключателями (рис. 13).

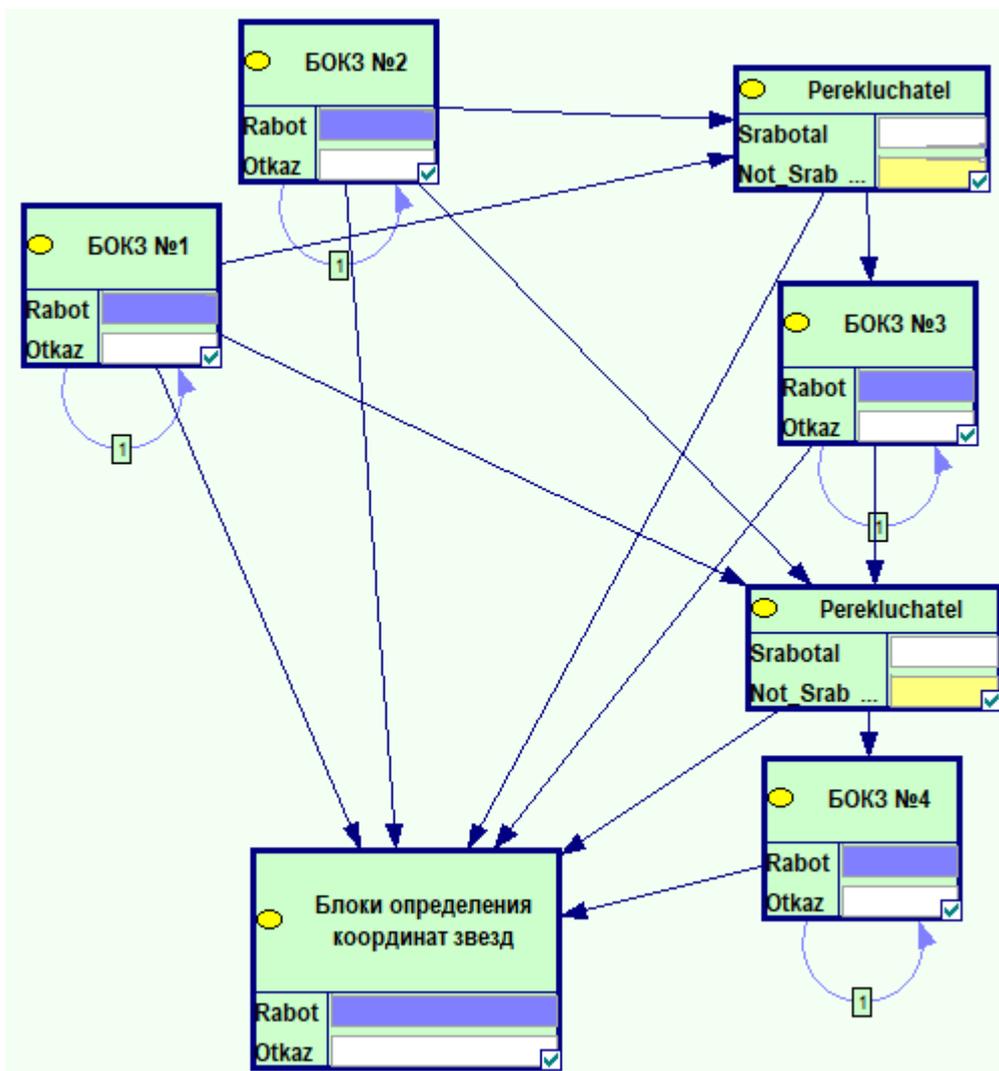


Рис. 13. Пример ДБСД, моделирующей блоки определения координат звезд

Модель байесовской сети для расчета надежности и мониторинга технического состояния СУД КА

Для всей СУД КА динамическая байесовская сеть представлена на рис. 14.

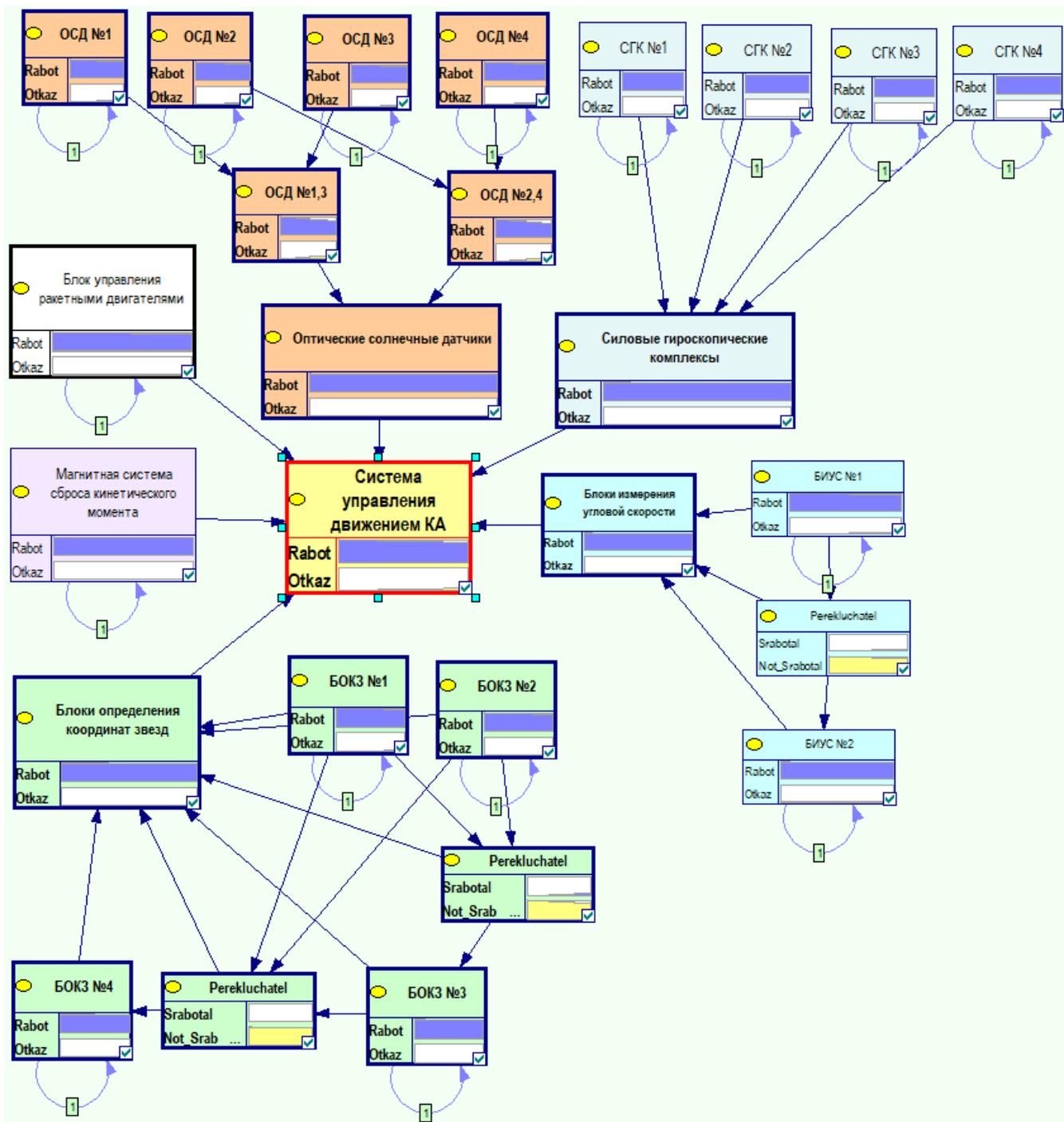


Рис. 14. Динамическая байесовская сеть для расчета ВБР СУД КА, построенная по априорной информации

Данная модель позволяет рассчитывать ВБР СУД КА как по начальной (априорной) информации о надежности, входящих в нее элементов (блоков), так и с учетом поступления новой информации об отказах, например, ОСД №1 отказал в момент времени $t=100$ ч, БОКЗ №2 отказал в момент времени $t=200$ ч (рис. 15).

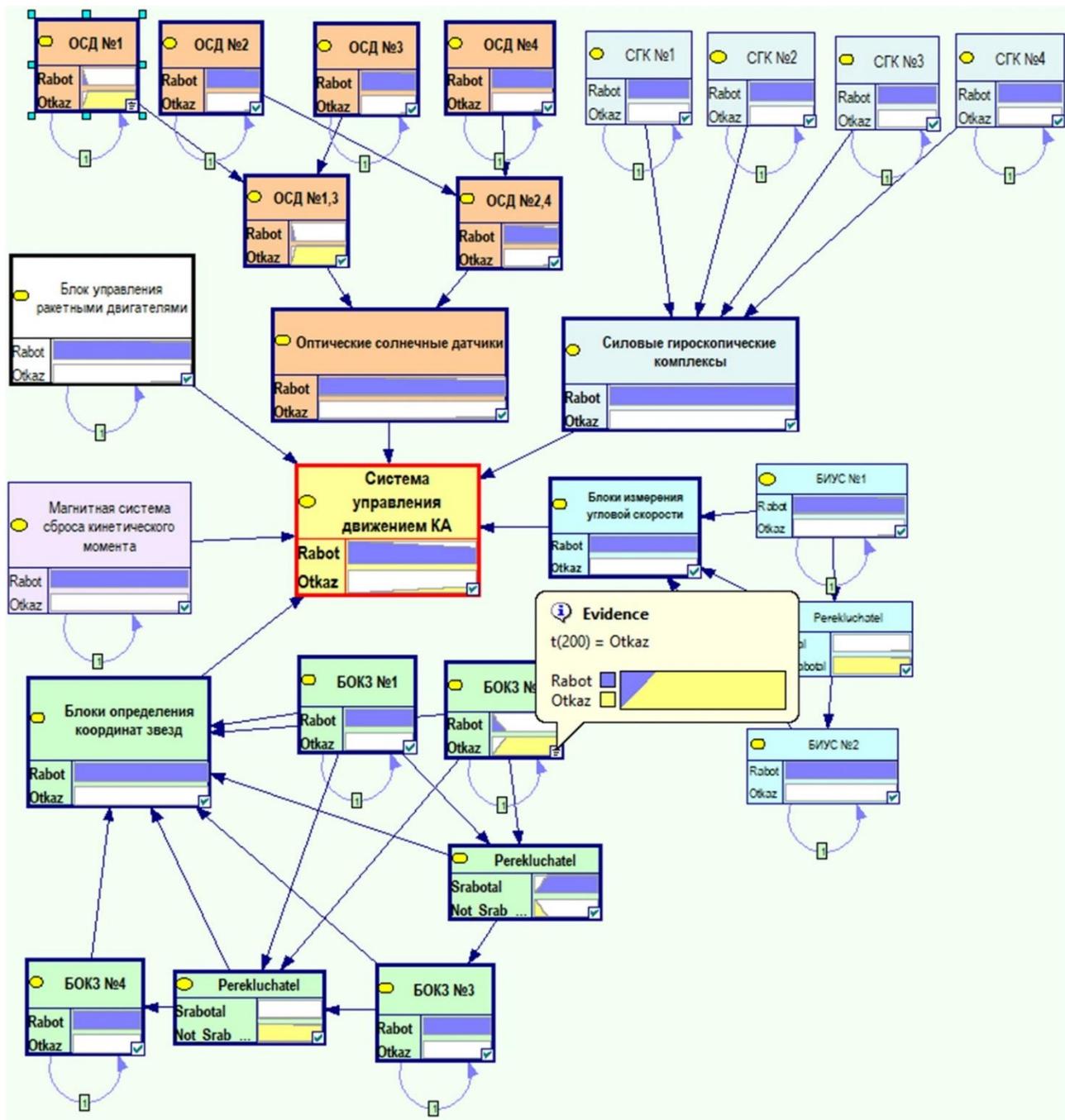


Рис. 15. Динамическая байесовская сеть для расчета ВБР СУД КА с учетом поступления информации об отказах ОСД №1 и БОКЗ №2

Графики ВБР СУД КА при априорной информации и при поступлении об отказах ОСД №1 и БОКЗ №2 представлены на рис. 16.

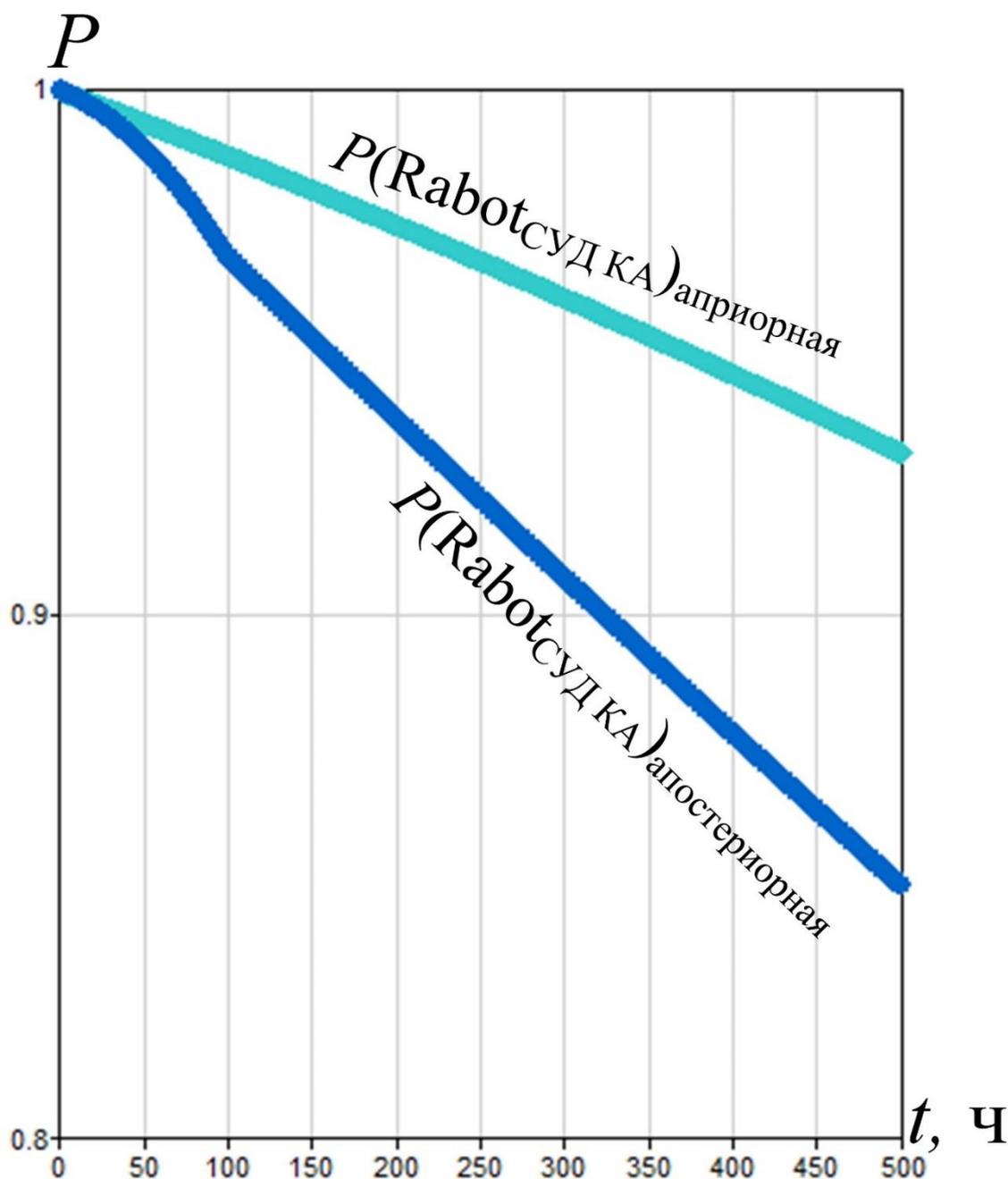


Рис. 16. Графики ВБР СУД КА при априорной информации и при поступлении об отказах ОСД №1 и БОКЗ №2

Также данная модель может быть использована для поиска причин отказа всей системы СУД КА. Например, известно, что СУД КА отказала в момент времени $t=800$ ч (рис. 17).

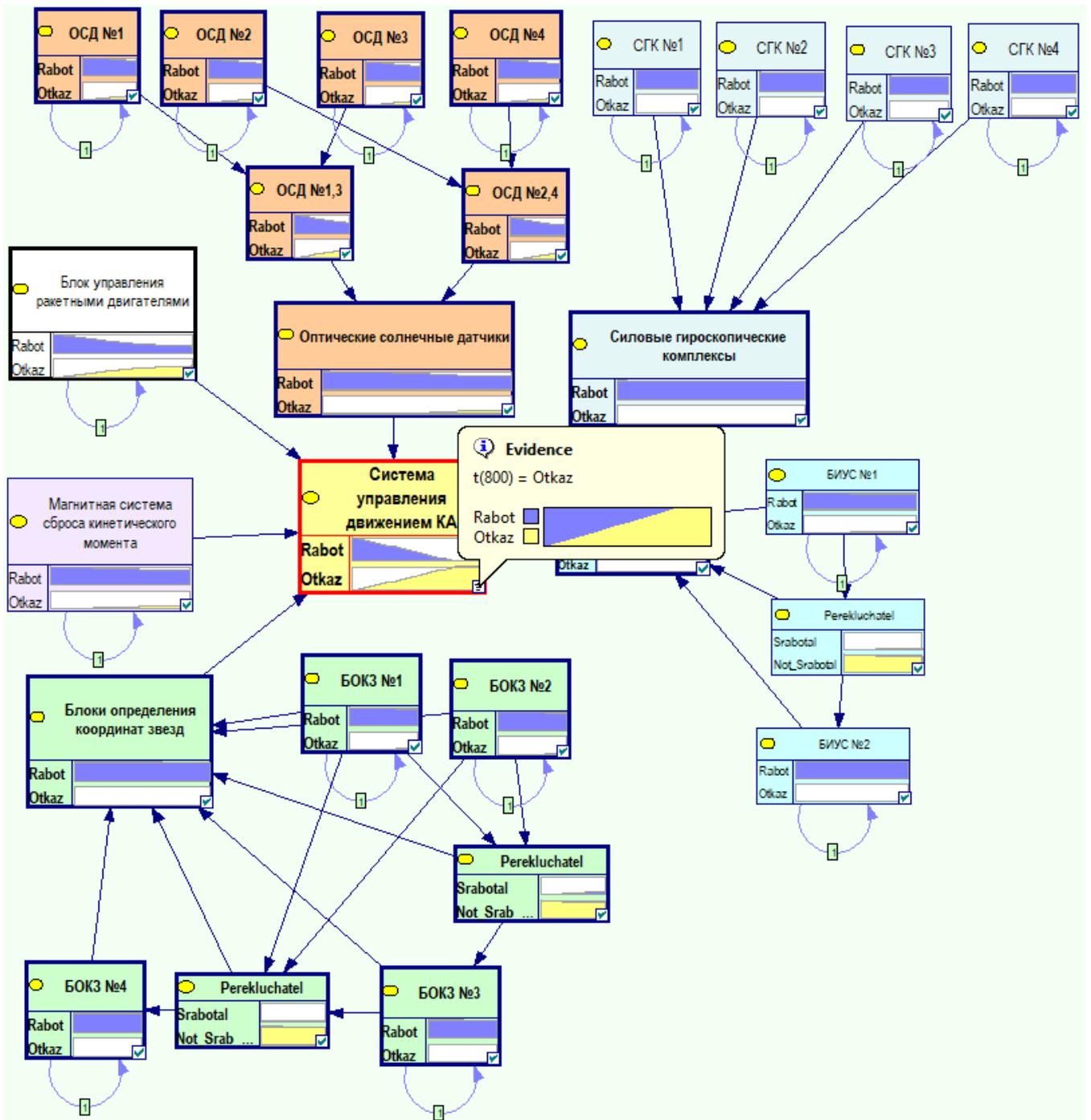


Рис. 17. Динамическая байесовская сеть при поступлении информации об отказе СУД КА в момент времени $t=800$ ч

Как видно из рис. 17 наиболее вероятной причиной отказа является отказ блока управления ракетными двигателями. Если проверка с помощью бортового или наземного комплекса управления данного блока показала его работоспособность, то данную информацию также можно ввести в сеть (например, в момент времени $t=801$ ч

установлена работоспособность БУРД), что приведет к обновлению сети и следующей наиболее вероятной причиной отказа СУД КА является либо отказ оптических солнечных датчиков, либо отказ магнитной системы сброса кинетического момента, но более детальное рассмотрение позволяет отдать приоритет в очередности проверки ОСД, так как его ВБР меньше ВБР МССКМ (рис. 18).

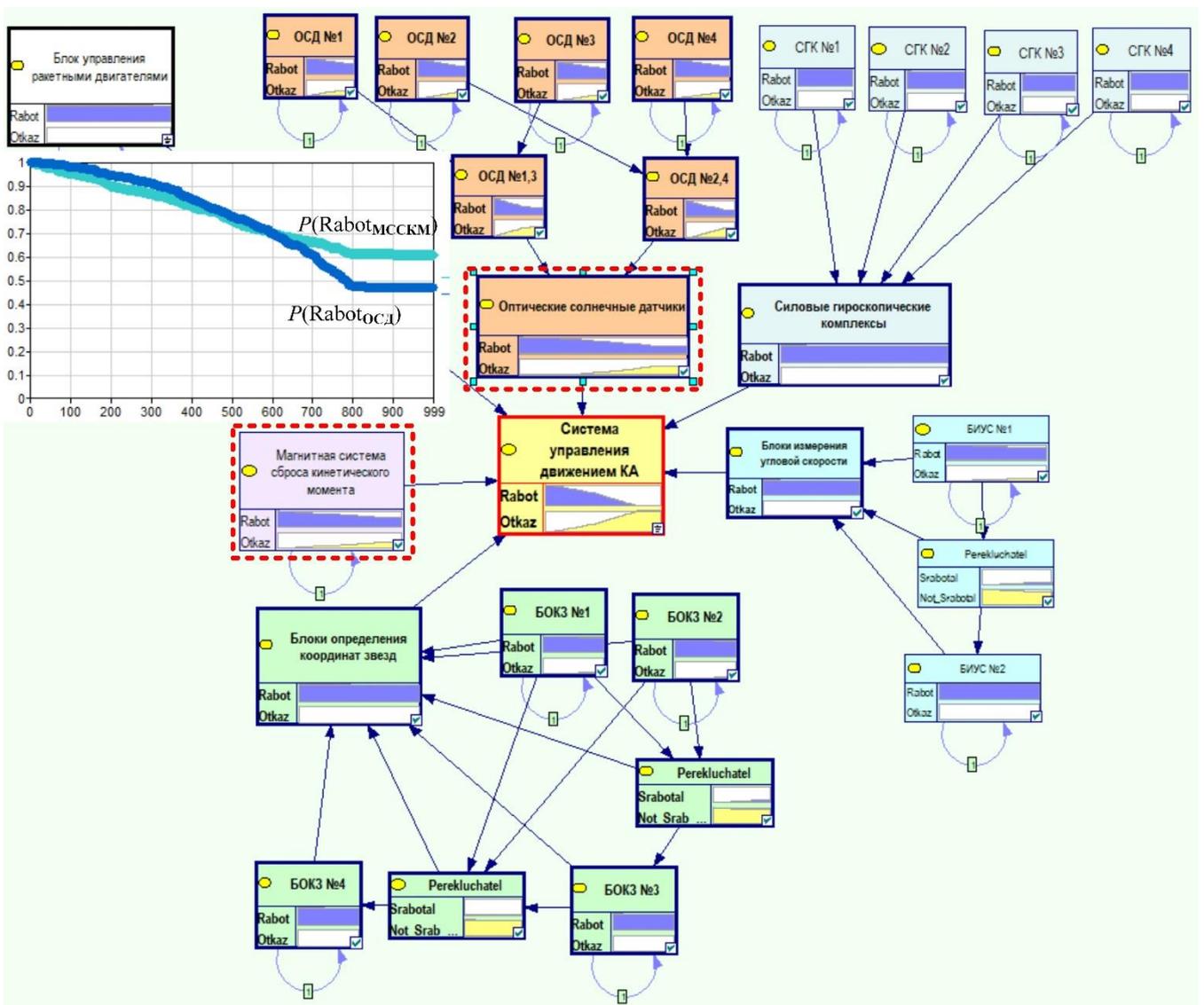


Рис. 18. Динамическая байесовская сеть при поступлении информации «Отказ СУД КА в момент $t=800$ ч» и «БУРД работоспособен, $t=801$ ч»

Заключение

Таким образом, предложенное применение моделей искусственного интеллекта – динамических байесовских сетей доверия – для расчета ВБР сложных технических устройств позволяет учитывать не только начальную (априорную) информацию, но и поступающие данные, что необходимо для решения задач мониторинга технического состояния в процессе эксплуатации. Для систем с ненагруженным резервированием можно снять допущения об отсутствии ошибок, безотказности и мгновенности срабатывания переключателей.

Имея факт отказа сложного технического устройства, можно решать обратную задачу в байесовских сетях – поиск (объяснение) причин отказа.

Список источников

1. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. ГОСТ Р 27.102-2021. – М.: Издательство стандартов, 2021. – 45 с.
2. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
3. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. - СПб: Политехника, 2000. – 248 с.
4. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: учебное пособие. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
5. Перфильев А.С. Пирогов С.Ю., Семенов Е.Н. Перфильев А.С. Анализ эксплуатационной надежности разгонных блоков средств выведения космических

аппаратов и пути ее повышения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2018. № 665. С. 223-230.

6. Кобзарев И.М. Копкин Е.В. Использование меры ценности информации В.И. Корогодина для построения гибких диагностических процедур распознавания технического состояния бортовых систем космических аппаратов // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2019. № 671. С. 326-337.

7. Дмитриев А.К. Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем: учебное пособие. – СПб.: ВИКУ имени А.Ф. Можайского, 1999. – 171 с.

8. Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Мышко В.В. Анализ технического состояния космических средств. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – 189 с.

9. Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Мышко В.В. Контроль и диагностика космических средств: учебное пособие – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – 198 с.

10. Воронцов В.А., Федоров Е.А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=58817>

11. Заведеев А.И. Построение системы управления ориентацией космического аппарата повышенной отказоустойчивости // Труды МАИ. 2012. № 54. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29687>

12. Заведеев А.И., Ковалев А.Ю. Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата // Труды МАИ. 2012. № 54. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29688>

13. Копейка Е.А., Вербин А.В. Методический подход оценивания вероятности безотказной работы сложных технических систем с учетом характеристик системы контроля на основе байесовской сети доверия // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171411>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)
14. Брехов О.М., Балян А.В. Методика внедрения неисправностей для анализа работы протокола резервирования бортового маршрутизатора // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=57913>
15. Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В. Основы теории байесовских сетей: учебник. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2019. – 399 с.
16. Сукар Л.Э. Вероятностные графовые модели. Принципы и приложения / пер. с англ. А.В. Снастина. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 338 с.
17. Cowell R.G., Dawid A.P., Lauritzen S.L., Spiegelhalter D.J. Probabilistic Networks and Expert Systems, Springer-Verlag, 1999.
18. Jensen F.V. Bayesian Networks and Decision Graphs, New York, Springer-Verlag, 2001.
19. Pearl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference, New York, Morgan Kaufman Publ., 1991.
20. Дорожко И.В., Иванов О.А. Модель системы поддержки принятия решений для диагностирования бортовых систем космического аппарата на основе байесовских сетей // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158259>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-19](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-19)

21. Дорожко И.В., Тарасов А.Г., Барановский А.М. Оценка надежности структурно-сложных технических комплексов с помощью моделей байесовских сетей доверия в среде GeNIe // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2015. № 3. С. 36–45.
22. Дорожко И.В., Захарова Е.А., Осипов Н.А. Модель оценки вероятности безотказной работы сложных технических комплексов на основе динамических байесовских сетей // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2019. № 669. С. 216-223.
23. Дорожко И.В., Осипов Н.А., Иванов О.А. Прогнозирование технического состояния сложных технических систем с помощью метода Берга и байесовских сетей // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=118181>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-14)
24. Лупашко М.Н., Степанов И.В., Тимофеев В.В. Методика определения периодичности использования запасных элементов вычислительной системы военного назначения // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2021. № 678. С. 310–315.
25. Тимофеев В.В. Надежность автоматизированных систем: учебное пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2017. – 76 с.

References

1. *Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob"ekta. Terminy i opredeleniya. GOST R 27.102-2021* (Dependability in technics. Dependability of item. Terms and definitions. State Standard 27.102-2021), Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2021, 45 p.

2. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* (Fundamentals of reliability theory), Saint Petersburg, BKhV-Petersburg, 2006, 702 p.
3. Ryabinin I.A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem* (Reliability and safety of structurally complex systems), Saint Petersburg, Politehnika, 2000, 248 p.
4. Cherkesov G.N. *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov* (Reliability of hardware and software systems), Saint Petersburg, Piter, 2005, 479 p.
5. Perfil'ev A.S. Pirogov S.Yu., Semenov E.N. Perfil'ev A.S. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2018, no. 665, pp. 223-230.
6. Kobzarev I.M. Kopkin E.V. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2019, no. 671, pp. 326-337.
7. Dmitriev A.K. *Modeli i metody analiza tekhnicheskogo sostoyaniya bortovykh sistem* (Models and methods of analysis of the technical condition of on-board systems: training manual), Saint Petersburg, VIKU imeni A.F. Mozhaiskogo, 1999, 171 p.
8. Kopkin E.V., Kravtsov A.N., Myshko V.V. *Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya kosmicheskikh sredstv* (Analysis of the technical condition of space assets), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2016, 189 p.
9. Kopkin E.V., Kravtsov A.N., Myshko V.V. *Kontrol' i diagnostika kosmicheskikh sredstv* (Control and diagnosis of space tools: a training manual), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2016, 198 p.
10. Vorontsov V.A., Fedorov E.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58817>

11. Zavedeev A.I. *Trudy MAI*, 2012, no. 54. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29687>
12. Zavedeev A.I., Kovalev A.Yu. *Trudy MAI*, 2012, no. 54. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29688>
13. Kopeika E.A., Verbin A.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171411>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)
14. Brekhov O.M., Balyan A.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57913>
15. Tulup'ev A.L., Nikolenko S.I., Sirotkin A.V. *Osnovy teorii baiesovskikh setei: uchebnik* (The basics of the theory of Bayesian networks), Saint-Petersburg, Izd-vo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2019, 399 p.
16. Sukar L.E. *Veroyatnostnye grafovye modeli. Printsipy i prilozheniya* (Probabilistic Graphical Models. Principles and Applications), Moscow, DMK Press, 2021, 338 p.
17. Cowell R.G., Dawid A.P., Lauritzen S.L., Spiegelhalter D.J. *Probabilistic Networks and Expert Systems*, Springer-Verlag, 1999.
18. Jensen F.V. *Bayesian Networks and Decision Graphs*, New York, Springer-Verlag, 2001.
19. Pearl J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, New York, Morgan Kaufman Publ., 1991.
20. Dorozhko I.V., Ivanov O.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158259>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-19](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-19)

21. Dorozhko I.V., Tarasov A.G., Baranovskii A.M. *Intellektual'nye tekhnologii na transporte*, 2015, no. 3, pp. 36–45.
22. Dorozhko I.V., Zakharova E.A., Osipov N.A. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii im. A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 669, pp. 216-223.
23. Dorozhko I.V., Osipov N.A., Ivanov O.A. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118181>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-14)
24. Lupashko M.N., Stepanov I.V., Timofeev V.V. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2021, no. 678. pp. 310–315.
25. Timofeev V.V. *Nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem* (Reliability of automated systems), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2017, 76 p.

Статья поступила в редакцию 21.05.2024

Одобрена после рецензирования 27.05.2024

Принята к публикации 28.08.2024

The article was submitted on 21.05.2024; approved after reviewing on 27.05.2024; accepted for publication on 28.08.2024