

Научная статья

УДК 681.5

DOI: [10.34759/trd-2022-125-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-23)

## **МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ**

**Игорь Владимирович Дорожко<sup>1</sup>, Георгий Михайлович Горохов<sup>2</sup>,**

**Иван Алексеевич Кириллов<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

<sup>1,2,3</sup>[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

*Аннотация.* В статье предложено применение динамических байесовских сетей и темпоральной логики для разработки систем поддержки принятия решений операторов сложных технических систем. Основным преимуществом предлагаемого подхода является возможность учета как разнородной априорной информации, включающей показатели надежности и диагностирования сложных технических систем, так и поступающих измерительных данных. Приводится реализация данного подхода на примере системы поддержки принятия решений оператора автоматизированной системы управления технологическим оборудованием системы

заправки ракеты-носителя, особенностью которой при анализе надежности является необходимость учета элементов с тремя несовместными состояниями – работоспособное, отказ типа «обрыв» и отказ типа «замыкание», по-разному влияющим на ход технологического процесса. Показаны варианты использования разработанной системы поддержки принятия решений для прогнозирования и ретроспективного анализа.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, байесовская сеть, автоматизированная система управления, апостериорный вывод

**Для цитирования:** Дорожко И.В., Горохов Г.М., Кириллов И.А. Методический подход к разработке системы поддержки принятия решений оператора автоматизированной системы управления технологическими процессами на основе динамических байесовских сетей // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-23)

Original article

## **METHODOLOGICAL APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE OPERATOR OF AN AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM BASED ON DYNAMIC BAYESIAN NETWORKS**

**Igor V. Dorozhko<sup>1</sup>, Georgy M. Gorokhov<sup>2</sup>, Ivan A. Kirillov<sup>3</sup>**

Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint-Petersburg, Russia

<sup>1,2,3</sup>[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

**Abstract.** The article describes a scientific and methodological approach that can be used in the development of intelligent decision support systems for operators of automated process control systems.

The proposed approach is based on the mathematical apparatus of dynamic Bayesian networks, as well as the basic concepts and relations of the theory of reliability and technical diagnostics of systems. The initial data are information about the algorithm of the system functioning and the course of the technological process, information about the reliability (structural and logical circuits, failure rates of elements) of technological equipment, as well as diagnostic models linking the types of technical conditions and diagnostic signs. It is proposed to use temporal connections (temporal logical-probabilistic dependencies) in a dynamic Bayesian network to simulate changes in the technical states of elements of technological equipment and describe the dynamics of the technological process. A posteriori conclusion allows combining heterogeneous initial information and incoming new data to obtain a comprehensive assessment of the progress of the technological process and the condition of technological equipment in order for the operator to make an informed decision on the continuation or suspension of the technological process, search for the causes of abnormal situations and the choice of proactive measures.

The implementation of this approach is given on the example of a decision support system for an operator of an automated control system for technological equipment of a booster refueling system, the peculiarity of which, when analyzing reliability, is the need to take into account elements with three incompatible states - operable, failure of the "break" type

and failure of the "closure" type, affecting the course of the technological process in different ways. The variants of using the developed decision support system for the current control of the technological process, forecasting and retrospective analysis in the search for the causes of abnormal situations are shown.

**Keywords:** decision support system, Bayesian network, automated control system, a posteriori inference

**For citation:** Dorozhko I.V., Gorokhov G.M., Kirillov I.A. Methodological approach to the development of a decision support system for the operator of an automated process control system based on dynamic Bayesian networks. *Trudy MAI*, 2022, no.125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-23)

## Введение

В настоящее время для обеспечения высокого качества управления, надежности и безопасности эксплуатации сложных технических систем широко применяются различные технические средства автоматизации и управления. В космической отрасли для повышения уровня автоматизации и обеспечения внедрений технологий так называемого «безлюдного старта» также активно внедряются различные интеллектуальные датчики, контроллеры, SCADA-системы и др. [1-3]. Однако данные средства в основном рассчитаны на штатную работу, при этом в нештатных ситуациях, при возникновении отказов и неисправностей роль оператора по-прежнему остается ключевой. Каждый цикл подготовки ракеты космического назначения (РКН) к пуску сопровождается множеством (от 100 до 300) отклонений

от предусмотренного хода процесса, которые называются замечаниями и фиксируются в соответствующих эксплуатационных документах [4-6]. Оперативность и точность принимаемых оператором решений особенно при возникновении нештатных ситуаций зачастую играют важнейшую роль для успешного выполнения технологического процесса или его безопасного прекращения. В связи с этим, широкое распространение находят системы поддержки принятия решений (СППР), способные повысить быстродействие работы операторов автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и обоснованность принимаемых ими решений [7, 8].

Следовательно, совершенствование и развитие автоматизированных рабочих мест операторов, разработка и внедрение в них СППР является достаточно перспективным направлением.

### **Основные возможности байесовских сетей для применения их при разработке систем поддержки принятия решений операторов автоматизированных систем управления технологическими процессами**

В результате анализа большинства аварий и происшествий в промышленности и энергетике были получены интересные данные: в 1960-х годах ошибка человека была первоначальной причиной аварий лишь в 20 % случаев, тогда как к концу XX века доля «человеческого фактора» стала приближаться к 80 % [9, 10]. В настоящее время задача повышения надежности систем диспетчерского управления решается внедрением в автоматизированные рабочие места операторов сложных технических

систем концепции SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных). SCADA представляет собой программные средства, предназначенные для разработки и реализации компьютерных рабочих станций операторов в системах автоматизации, поддерживающие основные функции визуализации измеряемой и контролируемой информации, передачи данных и команд системе контроля и управления [10]. При этом в нештатных ситуациях современные SCADA-системы могут, как правило, осуществлять лишь роль сигнализации и передачи команд управления, а само принятие решений на формирование требуемых команд управления осуществляет человек-оператор в условиях неопределенности и жестких временных ограничений, для которого зачастую система поддержки принятия решения была бы весьма полезной.

В настоящее время в области построения СППР активно развиваются вероятностные графовые модели, такие как байесовские сети доверия (БСД) [11–18], что обусловлено следующими их преимуществами:

1. Высокая эффективность решения задач для сложных систем с большим числом переменных. Используя правило декомпозиции, в байесовских сетях можно охватить огромное число элементов и связей между ними. В байесовских сетях применяется разбиение на отдельные фрагменты знаний, представляющие собой заключения экспертов-специалистов по ограниченному числу элементов и их связям.

2. Учет поступления новой информации, которую в терминологии байесовских сетей называют свидетельствами. При поступлении свидетельств производится пересчет всей байесовской сети. В большинстве случаев естественные человеческие

способности не позволяют адекватно оценить влияние поступившего свидетельства и принять решение, особенно при значительном количестве объектов и связей.

3. Интеграция разнородных данных. В байесовских сетях имеется возможность учета как статистических данных, так и экспертных оценок.

4. Простота интерпретации и наглядность. Графовые модели достаточно хорошо воспринимаются и анализируются.

5. Возможность учета динамических свойств, что позволяет решать задачи не только текущего оценивания, но и прогнозирования и ретроспективного анализа. Легко производится анализ по сценарию «что если...», что позволяет оценивать различные варианты развития процесса или изменения состояния системы.

6. Байесовские сети способны обучаться, это позволяет поддерживать принятие достоверных решений в условиях возможной ошибочной информации.

7. Байесовские сети доверия опираются на современные доступные программные технологии (Microsoft Bayesian Network Editor, Bayes Net Toolbox for Matlab, GeNIe, Smile, AgenaRisk, Analytica, Bayes Server, Hugin Expert), есть готовые библиотеки и модули для Python, C++, C#, MatLab, R, VB.NET и различных операционных систем (Windows, Linux, macOS).

8. Байесовские сети обладают относительной нечувствительностью к неполным данным.

## Методика построения системы поддержки принятия решений оператора автоматизированных систем управления технологическими процессами на примере системы и процесса заправки ракеты-носителя «Союз-2»

Формализованную обобщенную модель СППР оператора АСУ ТП можно описать в следующем виде:

$$\langle \mathbf{B}, \mathbf{S}, \mathbf{Pr}, N, D \rangle, \quad (1)$$

где  $\mathbf{B}$  – множество переменных, обозначающих элементы технологического оборудования, включая датчики и исполнительные механизмы,

$$\mathbf{B} = \{b_i \mid i = \overline{1, n}\};$$

$\mathbf{S}$  – множество технических состояний (ТС) элементов технологического оборудования,  $\mathbf{S} = \{S_j^i \mid j = \overline{0, m}, i = \overline{1, n}\};$

$\mathbf{Pr}$  – множество контролируемых признаков,  $\mathbf{Pr} = \{pr_l \mid l = \overline{1, k}\};$

$N$  – отображение, устанавливающее связь между элементами множества  $\mathbf{B}$ , исходя из деревьев отказов, структурно-логических схем надежности;

$D$  – отображение, устанавливающее связь между множествами  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{Pr}$ , исходя из алгоритмов функционирования технологического оборудования и процесса диагностирования.

При разработке системы поддержки принятия решений оператора некоторой технической системы необходимо провести анализ состава технологического оборудования, а также исследование процесса функционирования данной системы. Для примера рассмотрим систему заправки ракеты-носителя «Союз-2» (рис. 1) [1, 19].



При выполнении операции «Заправка блока «И» нафтилом ракеты-носителя «Союз-2» выполняются следующие действия [19]:

1. Выдается сигнал на открытие заправочно-сливного клапана (ЗСК) (рис. 1).
2. Открываются электропневмоклапаны ЭК7, ЭК3 и ЭК4, в результате чего осуществляется наддув емкости автозаправщика и открываются магистрали для заправки большим расходом.
3. Включается насос НЛ1 и начинается заправка большим расходом бака горючего блока «И». Осуществляется при этом контроль температуры (нафтил перед заправкой «захолаживается» и датчик температуры должен регистрировать отрицательную температуру порядка  $-18^{\circ}\text{C}$ ).

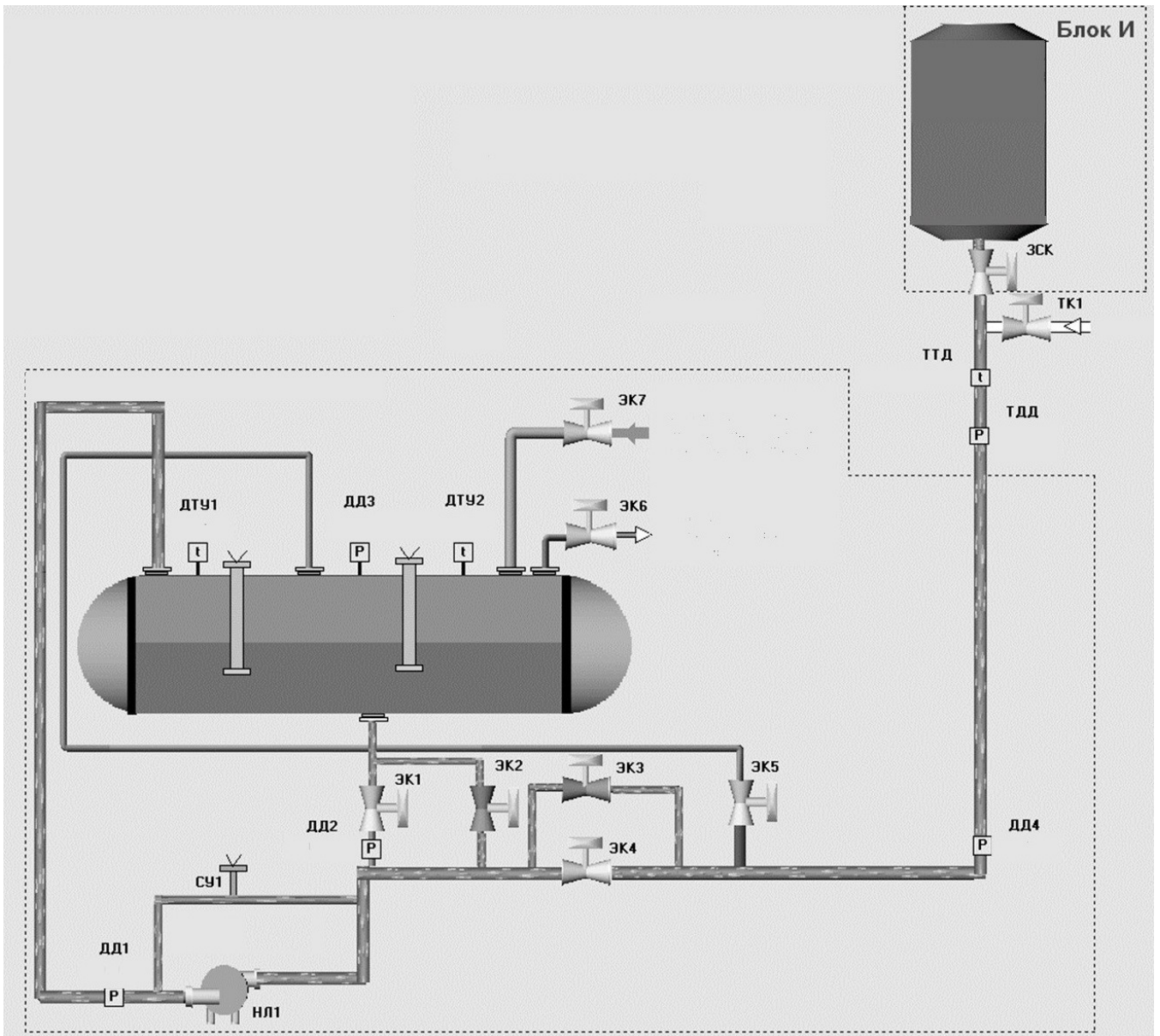


Рис. 1. Отображение элементов системы заправки блока «И» ракеты-носителя «Союз-2»

4. Спустя порядка 20 минут с момента начала заправки должен сработать датчик уровня и поступить сигнал «Предварительный уровень блока «И», после которого закрывается клапан ЭК4 и продолжается заправка малым расходом через открытый клапан ЭК3 до срабатывания датчика уровня и поступления сигнала «Номинальный уровень блока «И».

5. По сигналу «Номинальный уровень блока «И» (приблизительно спустя 25 минут с момента начала заправки) выключается насос НЛ1, закрываются клапаны ЭК3, ЭК7, ЗСК и формируется сигнал «Операция «Заправка блока «И» нафтилом завершена».

При отказах исполнительных механизмов (насоса, электропневмоклапанов) или датчиков основными нештатными ситуациями являются перелив компонентов ракетного топлива или, наоборот, его отсутствие в баках ступени ракеты-носителя. Также отказы датчиков могут привести к ложной сигнализации о нештатной ситуации или к отсутствию (несвоевременному получению) достоверной информации о ходе технологического процесса. Повысить обоснованность принимаемых оператором решений в данном случае могут системы поддержки принятия решений.

Методика построения СППР оператора системы заправки ракеты-носителя «Союз-2» на основе байесовской сети может быть представлена следующими этапами:

#### 1. Построение структуры байесовской сети доверия:

1.1. Создаются вершины байесовской сети, обозначающие элементы системы заправки – насос, электропневмоклапаны (ЭК), датчики (уровня, температуры, давления и т.п.) ( $\mathbf{V} = \{b_i | i = \overline{1, n}\}$ ) с указанием для каждого  $i$ -го блока видов технического состояния  $S_j^i | j = \overline{0, m}$ . Например, для датчика температуры (обозначение –  $b_2$ ) видами ТС будут работоспособное (обозначение –  $S_0^2$ ) и отказ (обозначение –  $S_1^2$ ), а для ЭК или, например, ЗСК

( $b_3$ ) видами технического состояния могут быть работоспособное ( $S_0^3$ ), отказ типа «обрыв» (клапан не пропускает –  $S_1^3$ ) и отказ типа «замыкание» (клапан постоянно пропускает –  $S_2^3$ ). Пример в бесплатной среде с открытым кодом GeNIe [20] представлен на рис. 2.

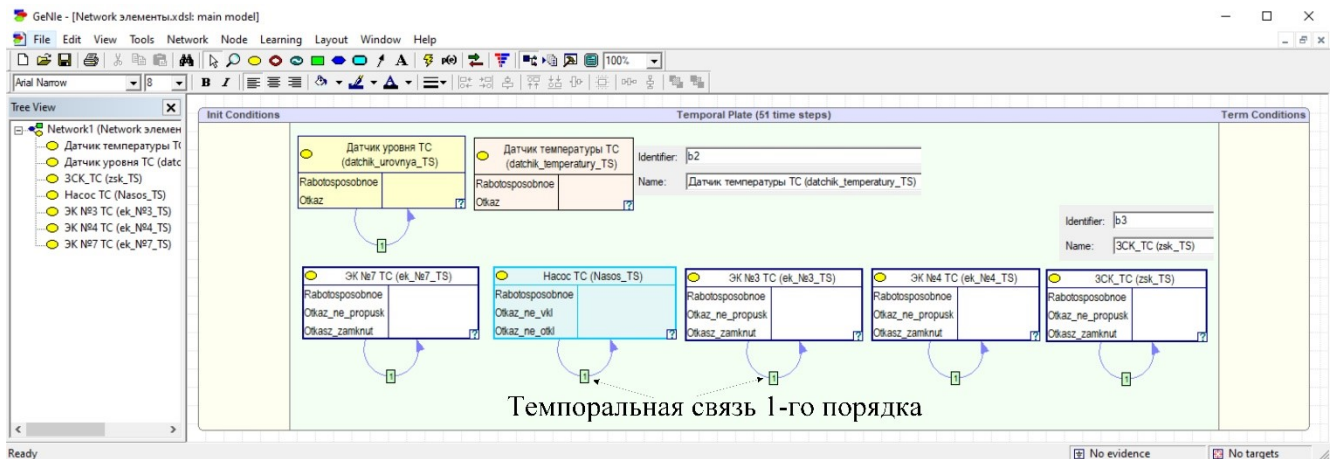


Рис. 2. Вершины байесовской сети, обозначающей элементы системы заправки

1.2. Задаются темпоральные связи для учета динамики изменения технического состояния элементов (рис. 2). Данная темпоральная связь позволяет смоделировать временную логико-вероятностную зависимость текущего состояния переменной от более ранних состояний. Например, вероятность отказа насоса в момент времени  $t$  при условии его работоспособности в момент времени  $t - 1$ .

1.3. Указываются (на основе структурных схем надежности) связи между вершинами байесовской сети, обозначающие элементы системы заправки.

1.4. Создаются вершины байесовской сети, обозначающие контролируемые признаки ( $\mathbf{Pr} = \{pr_l \mid l = \overline{1, k}\}$ ). Например, уровень топлива,

значение температуры или давления, включение или отключение насоса, открытие или закрытие ЭЖ.

1.5. Указываются связи между вершинами байесовской сети, обозначающими технические состояния элементов системы заправки ( $\mathbf{S} = \{S_j^i \mid j = \overline{0, m}, i = \overline{1, n}\}$ ) и диагностические признаки ( $\mathbf{Pr} = \{pr_l \mid l = \overline{1, k}\}$ ).

2. Указываются параметры байесовской сети.

2.1. Для элементов, указываются:

2.1.1. Безусловные вероятности в начальный момент времени, а именно,  $P(\text{Rabot}_i)_{t=0} = 1$  (предполагается, что в  $t=0$  прошел полный контроль и элемент работоспособен), и вероятности отказов  $P(\text{Otkaz}_i)_{t=0} = 0$ .

2.1.2. Условные вероятности, задающие динамику технических состояний во времени на основе априорных данных об интенсивностях отказов ( $\lambda_i$ ) и восстановлений ( $\mu_i$ ):

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

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

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

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

При этом если отказ рассматривается двух типов «замыкание» и «обрыв», число задаваемых условных вероятностей увеличится до 8. На рис. 3 представлены параметры переменной «Насос» с тремя несовместными состояниями («Работоспособное», «Отказ, насос не включается» и «Отказ, насос не отключается»).

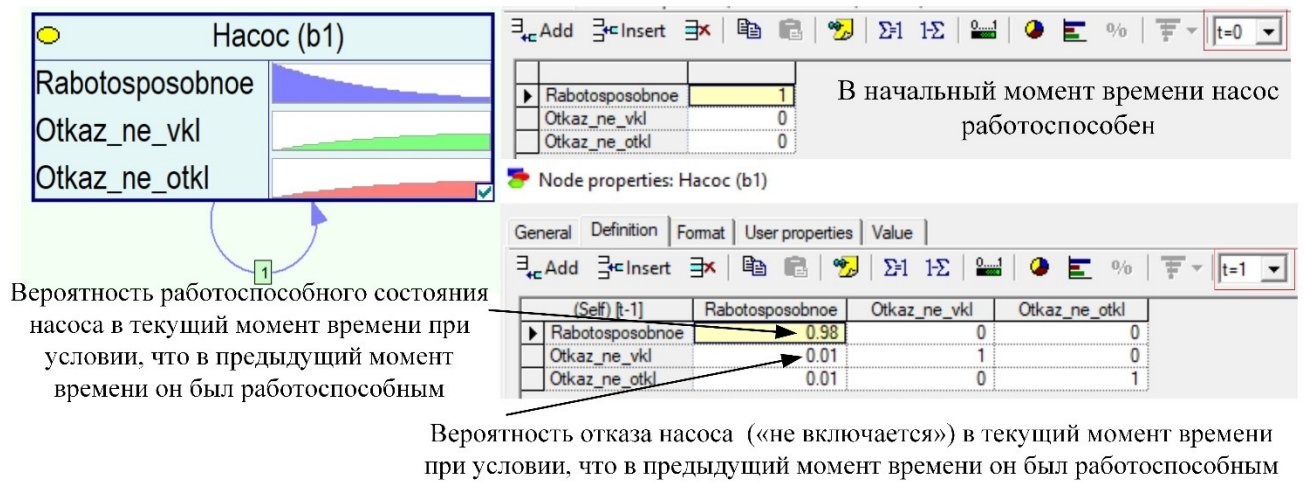


Рис. 3. Параметры вершины байесовской сети, обозначающей элемент технологического оборудования

2.2. Для блоков (модулей), имеющих в своем составе другие элементы и блоки, т.е. имеющие родительские переменные, указываются условные вероятности исходя из деревьев отказов или структурно-логических схем надежности [12-14]. Отображение  $N$ , устанавливающее связь между элементами множества  $S$ , исходя из схем надежности, может быть представлено в виде наборов условных вероятностей видов ТС блоков более высокого иерархического уровня от работоспособности (отказов) входящих в их состав элементов. На рис. 4 представлены примеры моделирования последовательного и параллельного соединений с помощью фрагментов байесовских сетей.

$$\begin{aligned}
 N : S \times S \rightarrow \{ & P(s_j^{<u>} / s_j^{<i>}) \mid j = \overline{0, m}; i, u = \overline{1, n} \} = \\
 = \left\{ \begin{array}{l} P(\text{Rabot}_j^{<u>} / \text{Rabot}_j^{<i>}), P(\text{Otkaz}_j^{<u>} / \text{Rabot}_j^{<i>}), \\ P(\text{Rabot}_j^{<u>} / \text{Otkaz}_j^{<i>}), P(\text{Otkaz}_j^{<u>} / \text{Otkaz}_j^{<i>}) \mid j = \overline{0, m}; i, u = \overline{1, n} \end{array} \right\} & \quad (2)
 \end{aligned}$$

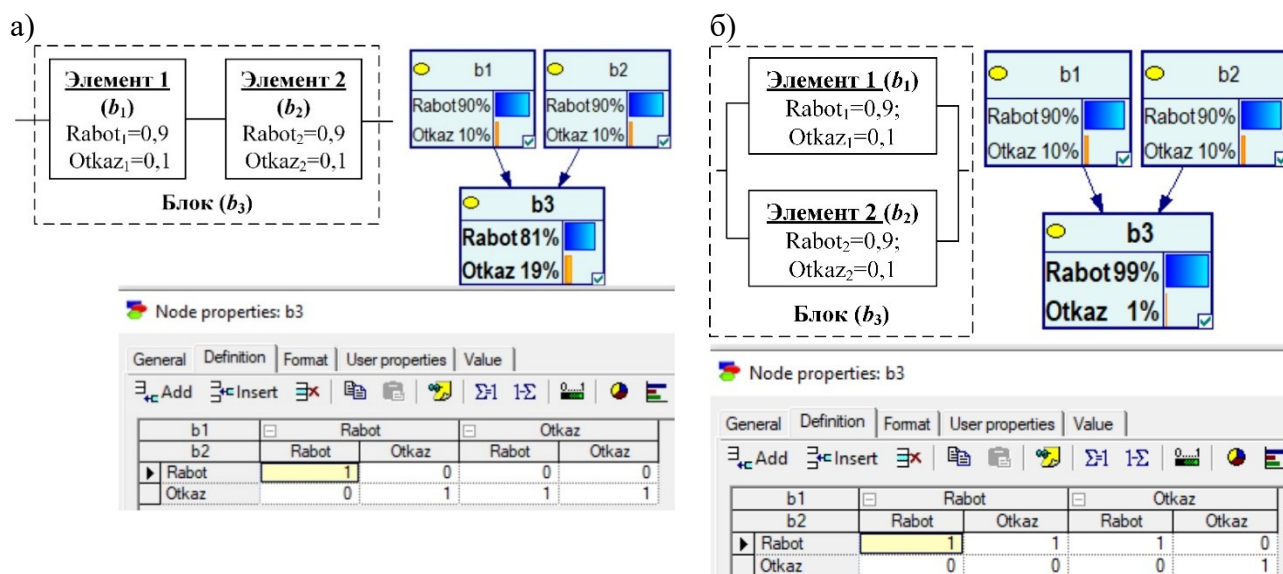


Рис. 4. Примеры моделей надежности с использованием байесовских сетей:  
 а) последовательное соединение; б) параллельное соединение

Из рис. 4 видно, что для простейших блоков (элементов) необходимо задать вероятности отказов и работоспособного состояния, а для блоков, содержащих в своем составе другие элементы (блоки) необходимо задать наборы условных вероятностей в зависимости от варианта структурно-логической схемы надежности.

Вероятность безотказной работы блока  $b_3$ , имеющего в своем составе блоки  $b_1$  и  $b_2$ , вычисляется исходя из значений безусловных и условных вероятностей (рис. 4) по следующему соотношению:

$$P(\text{Rabot}_3) = P(\text{Rabot}_3 / \text{Rabot}_1, \text{Rabot}_2) \cdot P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Rabot}_2) + P(\text{Rabot}_3 / \text{Rabot}_1, \text{Otkaz}_2) \times \\ \times P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Otkaz}_2) + P(\text{Rabot}_3 / \text{Otkaz}_1, \text{Rabot}_2) \cdot P(\text{Otkaz}_1) \cdot P(\text{Rabot}_2) + \\ + P(\text{Rabot}_3 / \text{Otkaz}_1, \text{Otkaz}_2) \cdot P(\text{Otkaz}_1) \cdot P(\text{Otkaz}_2).$$

Таким образом, для последовательного соединения имеем следующие вычисления:

$$P(\text{Rabot}_3) = 1 \cdot 0,9 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,9 \cdot 0,1 + 0 \cdot 0,1 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,1 \cdot 0,1 = 0,81.$$



Что подтверждается вычислениями по общеизвестной формуле для расчета последовательного соединения [21, 22]:

$$P(\text{Rabot}_3) = P(\text{Rabot}_1) \cdot P(\text{Rabot}_2) = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81.$$

Для параллельного соединения имеем следующий расчет с помощью наборов безусловных и условных вероятностей:

$$P(\text{Rabot}_3) = 1 \cdot 0,9 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,9 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,1 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,1 \cdot 0,1 = 0,99.$$

Что подтверждается также расчетами по общеизвестной формуле [21, 22]:

$$P(\text{Rabot}_3) = 1 - (1 - P(\text{Rabot}_1)) \cdot (1 - P(\text{Rabot}_2)) = 1 - (1 - 0,9) \cdot (1 - 0,9) = 0,99.$$

На рис. 5 показан апостериорный вывод, т.е. обновление априорных (начальных) значений вероятностей в зависимости от поступления новой информации (например, отказ  $b_1$ ). Для осуществления апостериорного (логико-вероятностного) вывода [11-19] необходимо приравнять к нулю вероятности исходов, несовместимые с поступившей новой информацией: в данном случае приравниваются к нулю условные вероятности работоспособного состояния  $b_3$  при работоспособности блока  $b_1$ , а именно,  $P(\text{Rabot}_3 / \text{Rabot}_1, \text{Rabot}_2) = P(\text{Rabot}_3 / \text{Rabot}_1, \text{Otkaz}_2) = 0$ , так как стало известно об отказе блока  $b_1$ . Вероятности оставшихся исходов нормируем с учетом значений априорных вероятностей:

$$P(\text{Rabot}_3 / \text{Otkaz}_1) = P(\text{Rabot}_3 / \text{Otkaz}_1, \text{Rabot}_2) \cdot P(\text{Rabot}_2) + P(\text{Rabot}_3 / \text{Otkaz}_1, \text{Otkaz}_2) \times P(\text{Otkaz}_2).$$

а)

б)





Рис. 5. Примеры апостериорного вывода в байесовских сетях при отказе одного элемента в блоках, содержащих два элемента соединенных:  
а) последовательно; б) параллельно

Из рис. 5 видно, что для последовательного состояния отказ одного из двух блоков приведет к отказу блока №3, а в случае параллельного соединения отказ одного из двух блоков приведет к уменьшению значения вероятности безотказной работы блока №3 с 0,99 до 0,9.

На рис. 4 и 5 представлены значения вероятностей, характеризующие показатели надежности блоков, соответствуют только одному временному срезу, т.е. на определенный момент времени. Для учета изменения значений показателей надежности в течение времени используем динамические байесовские сети (рис. 6).

Соответственно, для блока №1 задаются наборы вероятностей в начальный момент времени ( $P(\text{Rabot}_1)_{t=0} = 1$  и  $P(\text{Otkaz}_1)_{t=0} = 0$ ) и условные вероятности, задающие динамику технических состояний во времени на основе априорных данных об интенсивностях отказов и восстановлений:

- $P(\text{Rabot}_1(t)/\text{Rabot}_1(t-1)) = 0,9;$
- $P(\text{Otkaz}_1(t)/\text{Rabot}_1(t-1)) = 0,1;$
- $P(\text{Rabot}_1(t)/\text{Otkaz}_1(t-1)) = 0$  (если блок не восстанавливаемый);
- $P(\text{Otkaz}_1(t)/\text{Otkaz}_1(t-1)) = 1.$

Аналогично задаются наборы вероятностей для блока №2. Для блока №3 условные вероятности задаются по структурно-логическим схемам надежности аналогично рассмотренному ранее примеру на рис. 4.

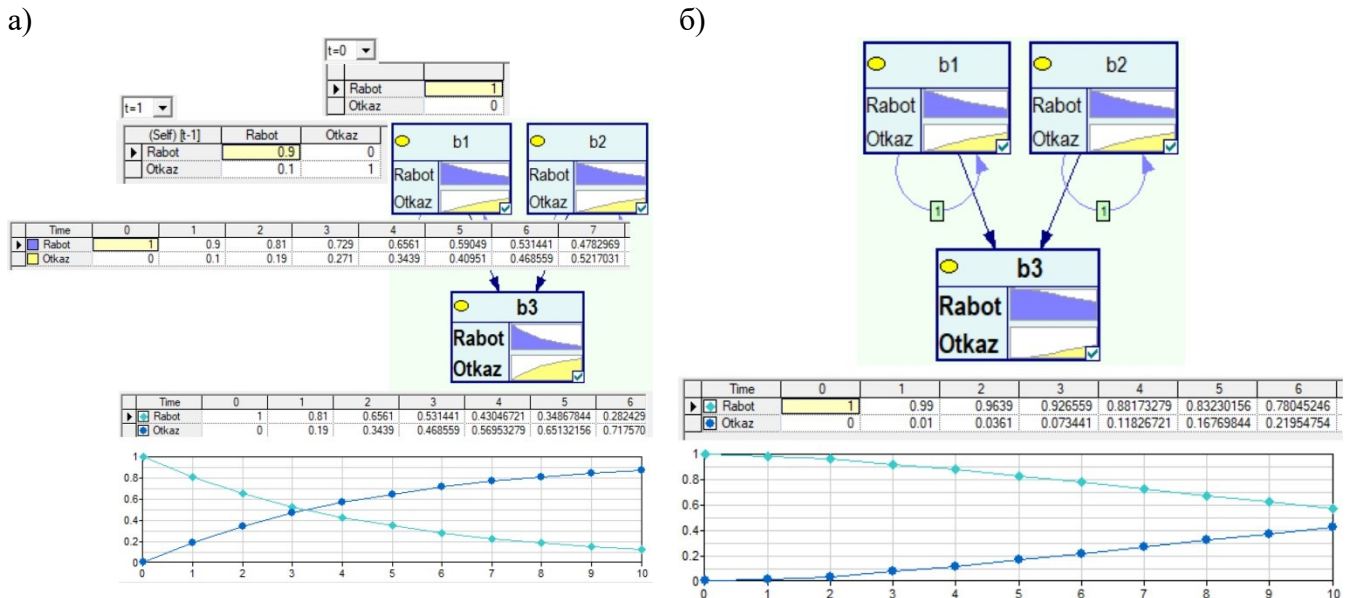


Рис. 6. Примеры моделей надежности с использованием байесовских сетей:

а) последовательное соединение; б) параллельное соединение

Тогда имеем следующие вычисления вероятностных распределений для блоков в динамической байесовской сети:

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

$$P(\text{Rabot}_2(t)) = P(\text{Rabot}_2(t)/\text{Rabot}_2(t-1))P(\text{Rabot}_2(t-1)) + P(\text{Rabot}_2(t)/\text{Otkaz}_2(t-1)) \times P(\text{Otkaz}_2(t-1));$$

$$P(\text{Rabot}_3(t)) = P(\text{Rabot}_3(t)/\text{Rabot}_1(t), \text{Rabot}_2(t)) \cdot P(\text{Rabot}_1(t)) \cdot P(\text{Rabot}_2(t)) + P(\text{Rabot}_3(t)/\text{Rabot}_1(t), \text{Otkaz}_2(t)) \times P(\text{Rabot}_1(t)) \cdot P(\text{Otkaz}_2(t)) + P(\text{Rabot}_3(t)/\text{Otkaz}_1(t), \text{Rabot}_2(t)) \cdot P(\text{Otkaz}_1(t)) \cdot P(\text{Rabot}_2(t)) + P(\text{Rabot}_3(t)/\text{Otkaz}_1(t), \text{Otkaz}_2(t)) \cdot P(\text{Otkaz}_1(t)) \cdot P(\text{Otkaz}_2(t)).$$

А при поступлении информации об отказе блока №1 в момент времени  $t=5$  результат апостериорного вывода определяется следующим образом. Начиная с  $t=6$ , распределения вероятностей вычисляются по формулам:

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

$$P(\text{Rabot}_1(t=6)) = P(\text{Rabot}_1(t=6)/\text{Rabot}_1(t=5)) \cdot P(\text{Rabot}_1(t=5)) + P(\text{Rabot}_1(t=6)/\text{Otkaz}_1(t=5)) \cdot P(\text{Otkaz}_1(t=5)) = 0,9 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0;$$

$$P(\text{Rabot}_1(t=7)) = P(\text{Rabot}_1(t=7)/\text{Rabot}_1(t=6)) \cdot P(\text{Rabot}_1(t=6)) + P(\text{Rabot}_1(t=7)/\text{Otkaz}_1(t=6)) \cdot P(\text{Otkaz}_1(t=6)) = 0,9 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0;$$

При этом задача вычисления распределений апостериорных вероятностей значений переменных, относящихся к прошлому состоянию (ретроспективный анализ), решается следующим образом:

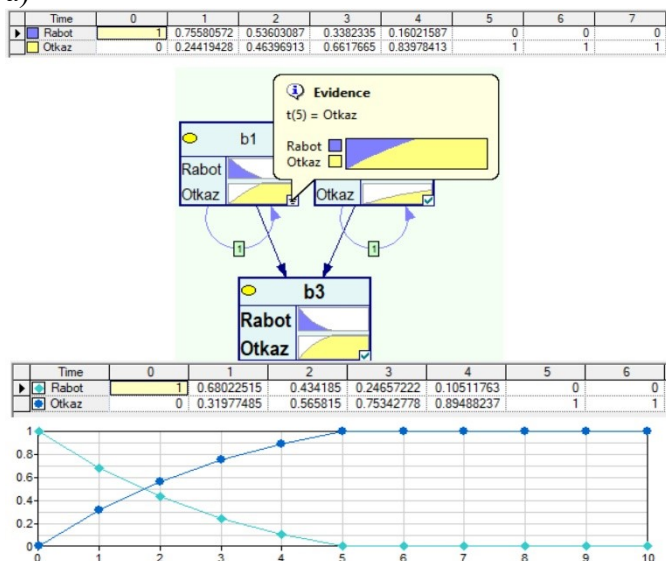
$$P(\text{Rabot}_1(t=4)) = P(\text{Rabot}_1(t=4)/\text{Rabot}_1(t=3)) \cdot P(\text{Rabot}_1(t=3)) + P(\text{Rabot}_1(t=4)/\text{Otkaz}_1(t=3)) \cdot P(\text{Otkaz}_1(t=3)) = 0,9 \cdot 0,729 + 0 \cdot 0,271 = 0,6561;$$

$$\begin{aligned} P(\text{Rabot}_1(t=4)/\text{Otkaz}_1(t=5)) &= \\ &= \frac{P(\text{Otkaz}_1(t=5)/\text{Rabot}_1(t=4)) \cdot P(\text{Rabot}_1(t=4))}{P(\text{Otkaz}_1(t=5)/\text{Rabot}_1(t=4)) \cdot P(\text{Rabot}_1(t=4)) + P(\text{Otkaz}_1(t=5)/\text{Otkaz}_1(t=4)) \cdot P(\text{Otkaz}_1(t=4))} = \\ &= \frac{0,1 \cdot 0,6561}{0,1 \cdot 0,6561 + 1 \cdot 0,3439} \approx 0,16; \end{aligned}$$

Из вычислений видно, что при получении информации об отказе блока №1 в момент времени  $t=5$  (рис. 7), данная информация влияет не только на распределение вероятностей в последующие моменты времени, но и уточняет оценки вероятностей в прошлые моменты времени: так вероятность работоспособности блока №1 в момент  $t=4$  изменилась с 0,6561 до 0,16. На основе ретроспективного анализа можно

осуществлять поиск наиболее вероятной причины отказа, расследовать причины нештатных ситуаций, аварий и т.д.

а)



б)

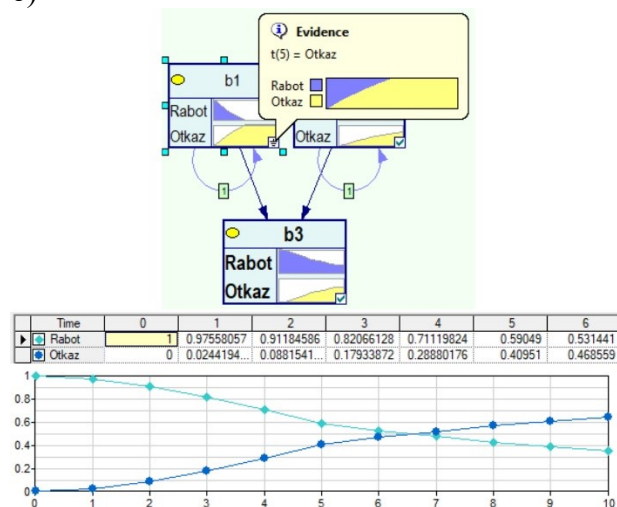


Рис. 7. Примеры апостериорного вывода в байесовских сетях при отказе одного элемента в блоках, содержащих два элемента соединенных: а) последовательно; б) параллельно

Таким образом, применение математического аппарата байесовских сетей к анализу надежности можно считать вполне адекватным и рассматривать как альтернативный подход.

2.3. Для контролируемых признаков задаются распределения условных вероятностей, связывающие значения контролируемых признаков и виды ТС (рис. 8 и 9) [11, 12, 23-27].

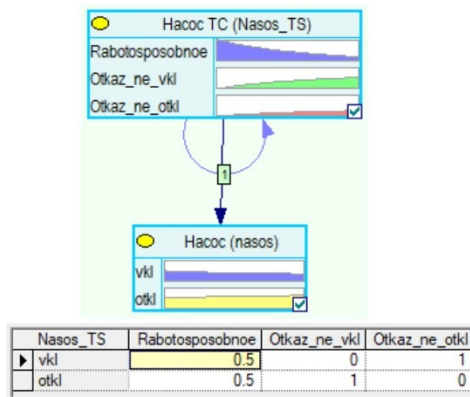


Рис. 8. Фрагмент байесовской сети, связывающей виды технического состояния и контролируемый признак насоса («включен» или «отключен»)



Рис. 9. Фрагмент байесовской сети, связывающей контролируемый признак «Уровень Предварительный» с состоянием технологического оборудования

## Пример работы СППР оператора автоматизированной системы управления процессом заправки ракеты-носителя «Союз-2»

На рис. 10 представлен вид байесовской сети в начальный момент времени при поступлении команды на заправку.

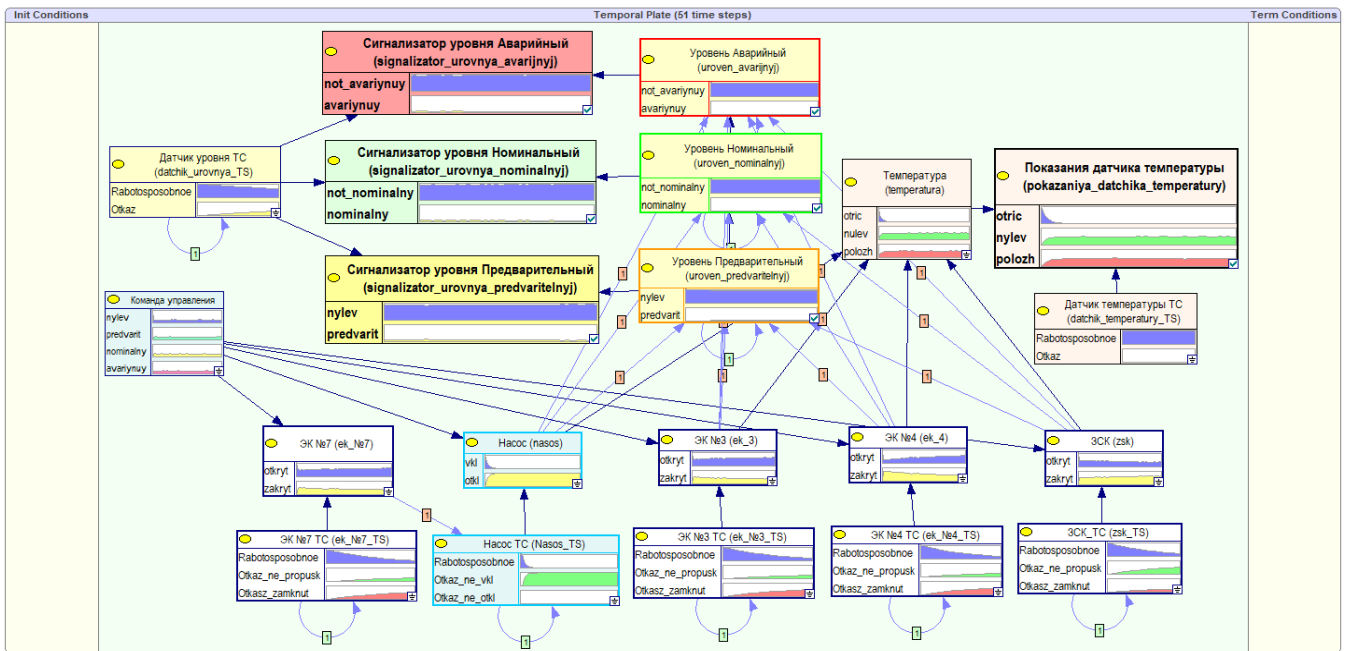


Рис. 10. Байесовская сеть, моделирующая алгоритм процесса заправки

Для учета погрешностей средств измерения вводятся отдельные переменные «Показания датчика температуры» и «Сигнализатор уровня Предварительный», «Сигнализатор уровня Номинальный», «Сигнализатор уровня Аварийный», в которых указываются наборы условных вероятностей, задающих достоверности и ошибки измерений уровня и температуры компонента ракетного топлива (рис. 11).

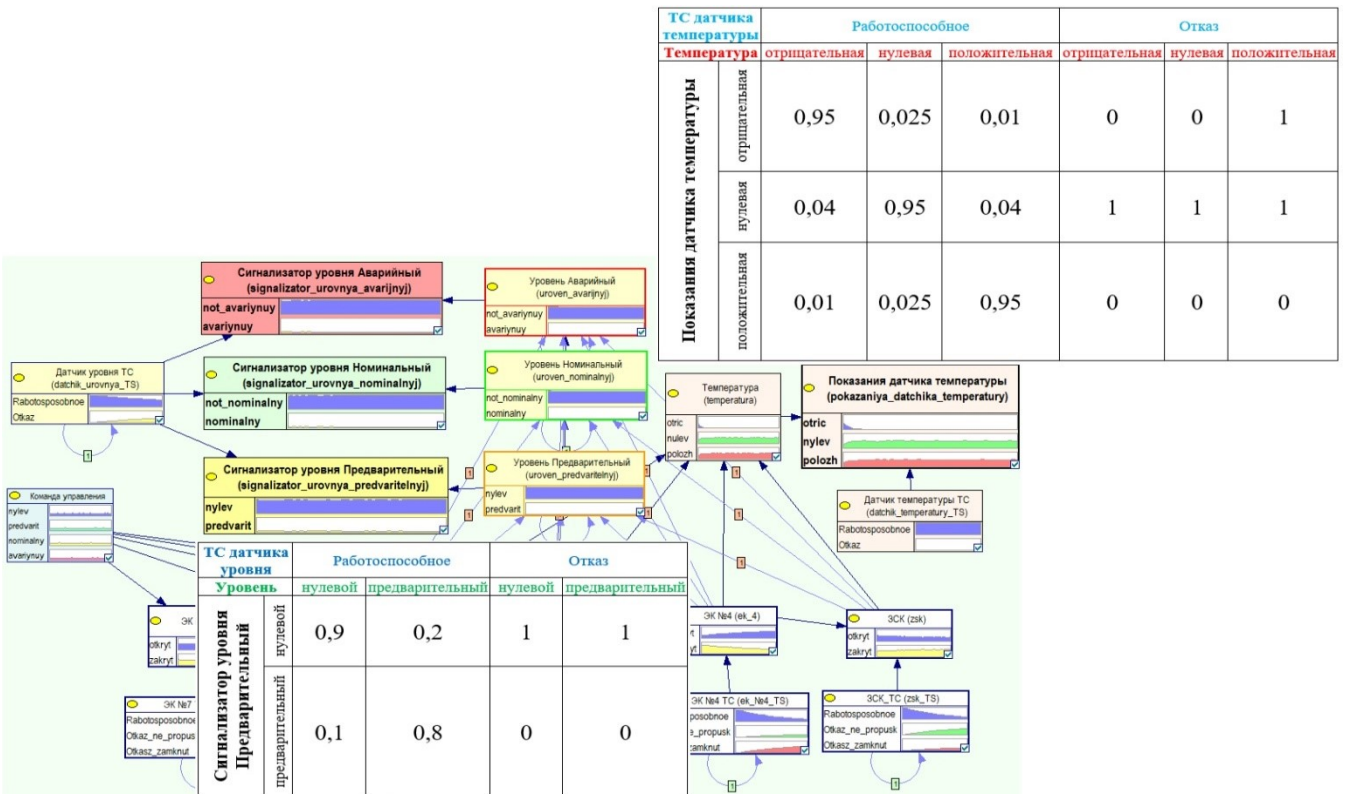


Рис. 11. Примеры учета достоверностей показаний датчиков в байесовской сети

Например, набор условных вероятностей, задающий достоверности и ошибки измерений уровня компонента ракетного топлива, может быть следующим:

–  $P=(\text{Сигнализатор уровня Предварительный}=\text{«нулевой»}/\text{Работ, Уровень предварительный}=\text{«нулевой»})=0,9;$

–  $P=(\text{Сигнализатор уровня Предварительный}=\text{«предварительный»}/\text{Работ, Уровень предварительный}=\text{«нулевой»})=0,1.$  Это означает, что если датчик уровня работоспособен, а уровень компонента топлива еще не достиг предварительного значения (нулевой), сигнализатор уровня может «ложно» сработать с вероятностью 0,1 из-за погрешности измерения;

–  $P=(\text{Сигнализатор уровня Предварительный}=\text{«нулевой»}/\text{Работ, Уровень предварительный}=\text{«предварительный»})=0,2,$  т.е. даже если датчик уровня работоспособен и фактически уровень компонента топлива достиг предварительного значения, сигнализатор уровня может и не сработать с вероятностью 0,2 из-за погрешности измерения;

$P=(\text{Сигнализатор уровня Предварительный}=\text{«предварительный»}/\text{Работ, Уровень предварительный}=\text{«предварительный»})=0,8.$

При условии, что технологическое оборудование системы работает штатно, после 20 минут от момента начала заправки ожидается сигнал о достижении предварительного уровня (рис. 12), а спустя 25 минут – сигнал о достижении номинального уровня (рис. 13).



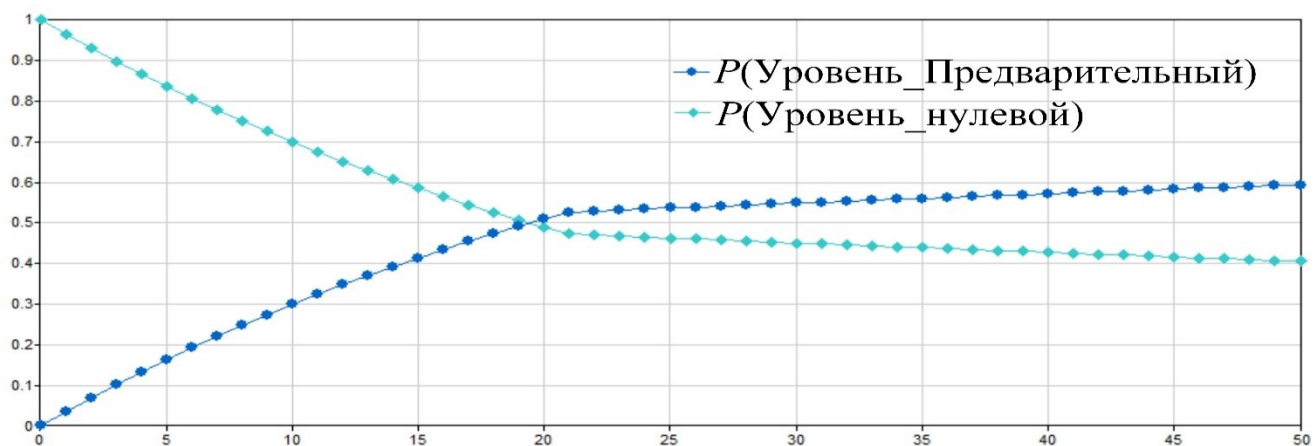


Рис. 12. График вероятности достижения предварительного уровня при штатной работе технологического оборудования

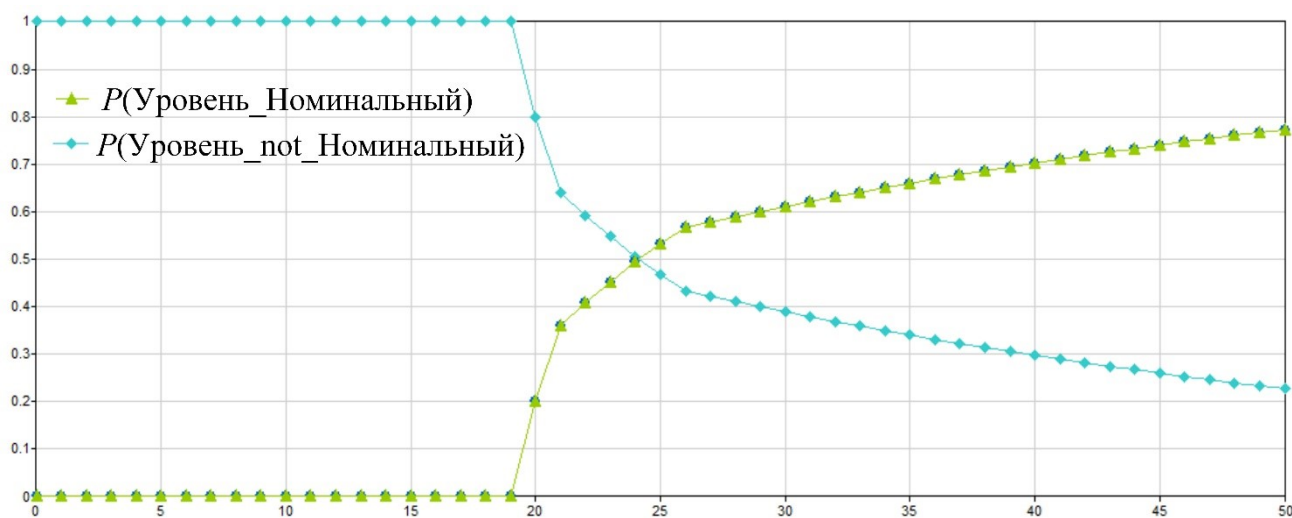


Рис. 13. График вероятности достижения номинального уровня при штатной работе технологического оборудования

При моделировании надежности технологического оборудования системы заправки имеет значение тип отказа («замыкание» или «обрыв»). Так, например, до момента достижения «Предварительного уровня» отказы типа «замыкание» запорной арматуры (электропневмоклапанов) могут даже не влиять на ход технологического процесса, а отказы типа «обрыв» приведут либо к замедлению процесса заправки, либо к остановке заправки и срыву выполнения задачи. При достижении «Номинального уровня» отказы типа «замыкание»



электропневмоклапанов и насоса могут привести к переливу компонентов ракетного топлива и другим нештатным ситуациям.

На рис. 14 представлен вид байесовской сети при учете показателей надежности технологического оборудования. На данном примере заправка проходила штатно до момента 27 минут, когда поступил сигнал «Аварийный уровень».

Из анализа рис. 14 следует, что наиболее вероятными причинами является несвоевременная отработка команды на отключение насоса и закрытие клапанов. Проведя ретроспективный анализ можно проранжировать элементы технологического оборудования по вероятностям отказов и синтезировать следующую последовательность проверок: «насос-ЗСК-ЭК №3-ЭК №4».

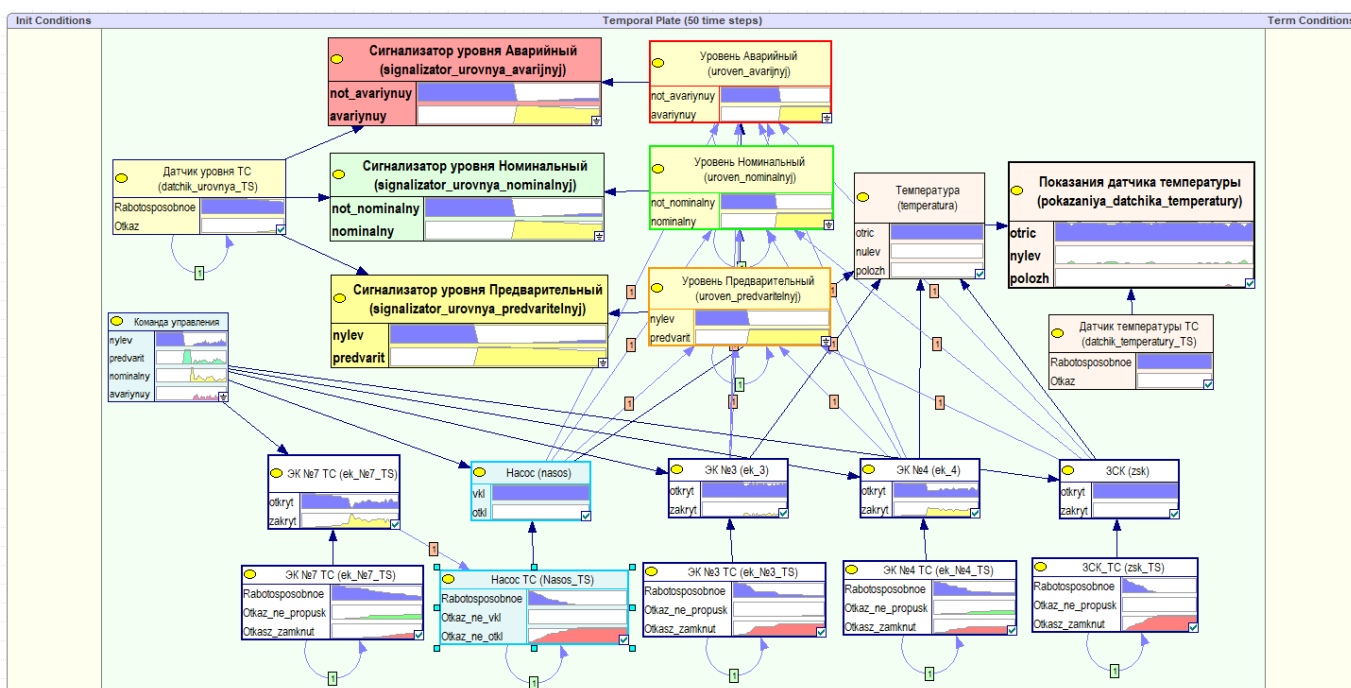


Рис. 14. Вид байесовской сети при поступлении сигнала «Аварийный уровень»

На рис. 15 и 16 представлен результат апостериорного вывода в байесовской сети и график прогноза вероятности достижения предварительного уровня при отказе

ЭК№4 в момент времени 10 мин, при условии что остальное технологическое оборудование работоспособно и работает в штатном режиме.

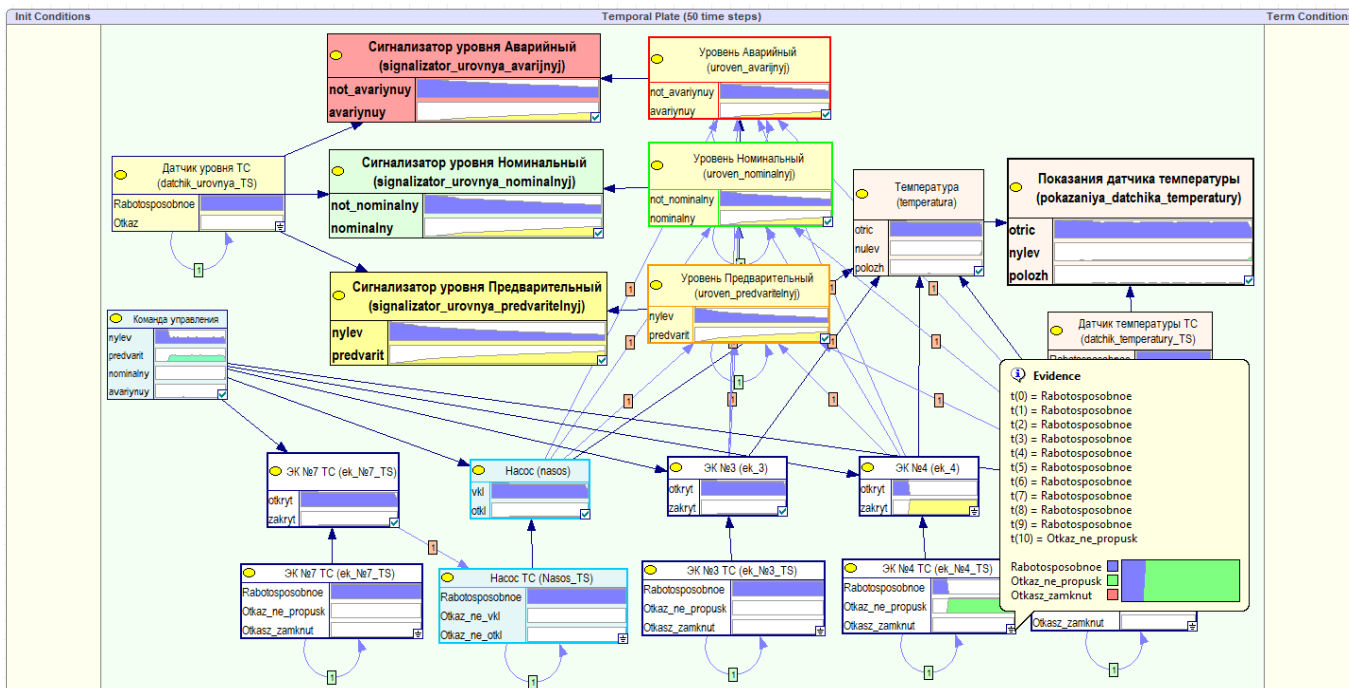


Рис. 15. Результат апостериорного вывода в байесовской сети при отказе ЭК№4 в момент времени 10 мин

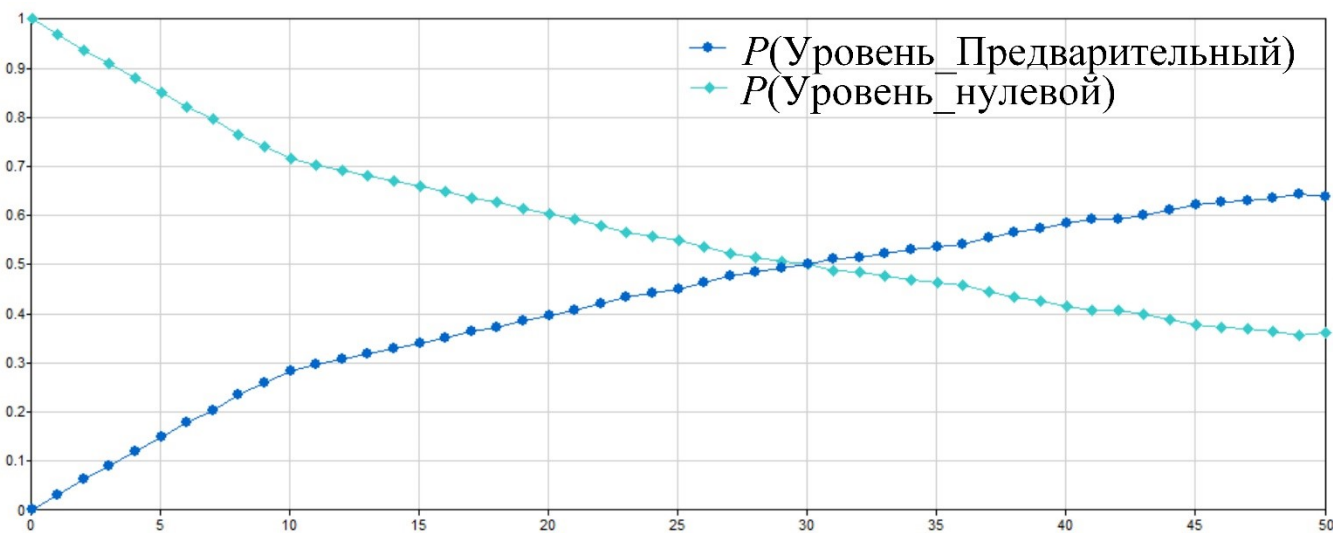


Рис. 16. График прогноза вероятности достижения предварительного уровня при отказе ЭК№4 в момент времени 10 мин

Анализ графика, изображенного на рис. 16, показывает, что при отказе ЭК №4 в момент 10 мин сигнал о достижении предварительного уровня можно ожидать лишь спустя 30 мин.

На рис. 17 представлен вид байесовской сети при срабатывании аварийного сигнализатора датчика уровня в момент  $t=20$  мин.

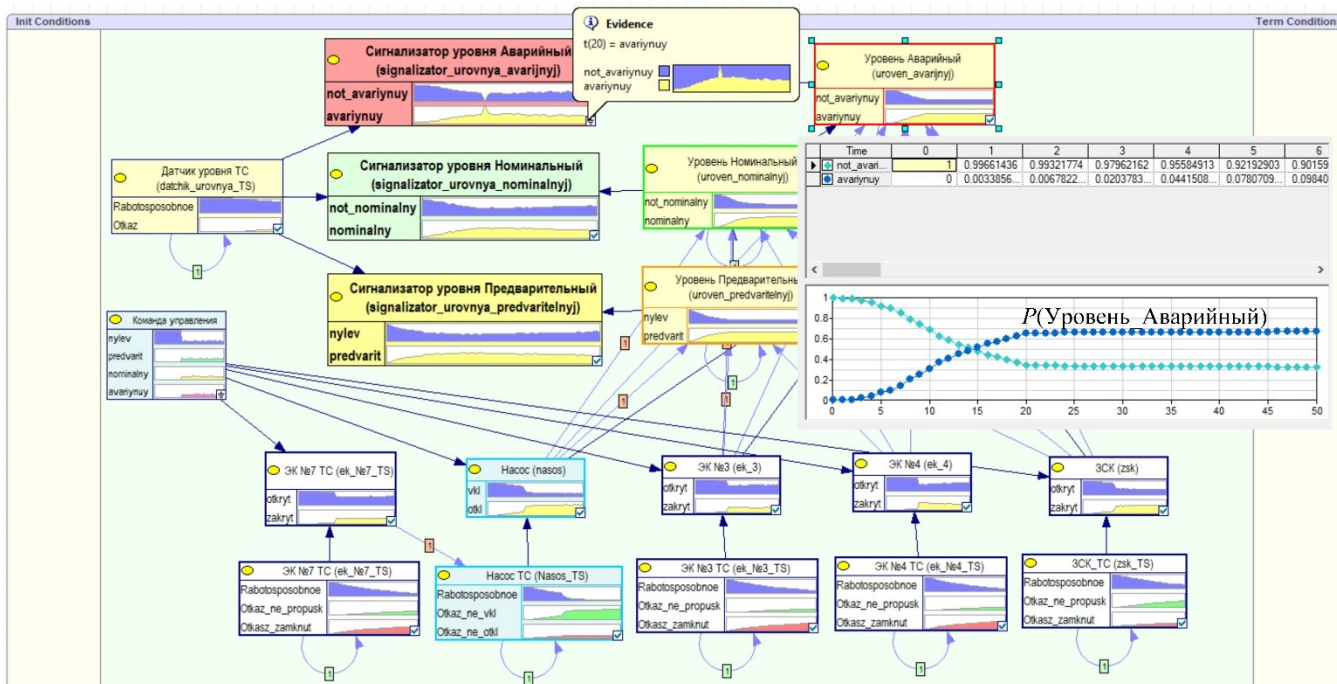


Рис. 17. Результат апостериорного вывода при срабатывании аварийного сигнализатора датчика уровня в момент  $t=20$  мин

При этом в модели СППР учтена надежность технологического оборудования системы заправки (возможны появления отказов типа «обрыв» и «замыкание») и достоверность показаний датчиков, т.е. несмотря на срабатывание аварийного сигнализатора датчика уровня в действительности уровень может и не быть аварийным с некоторой вероятностью ошибки, что соответствует «ложной тревоге».

При повторном поступлении в момент времени  $t=21$  мин информации об аварийном уровне, вероятность «ложной тревоги» значительно уменьшается (рис. 18).

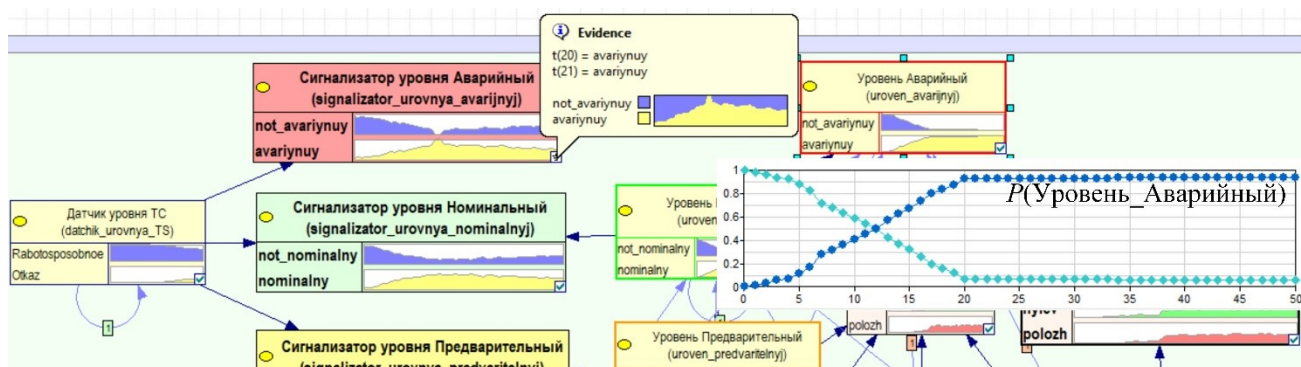


Рис. 18. Результат апостериорного вывода при поступлении сигнала «Аварийный уровень» повторного сигнала о = в момент  $t=20$  мин

Однако если в момент времени  $t=21$  мин поступит информация о прекращении срабатывания аварийного сигнализатора, вероятность аварийного уровня значительно уменьшается (рис. 19) и это обрабатывается СППР как временный отказ датчика уровня.

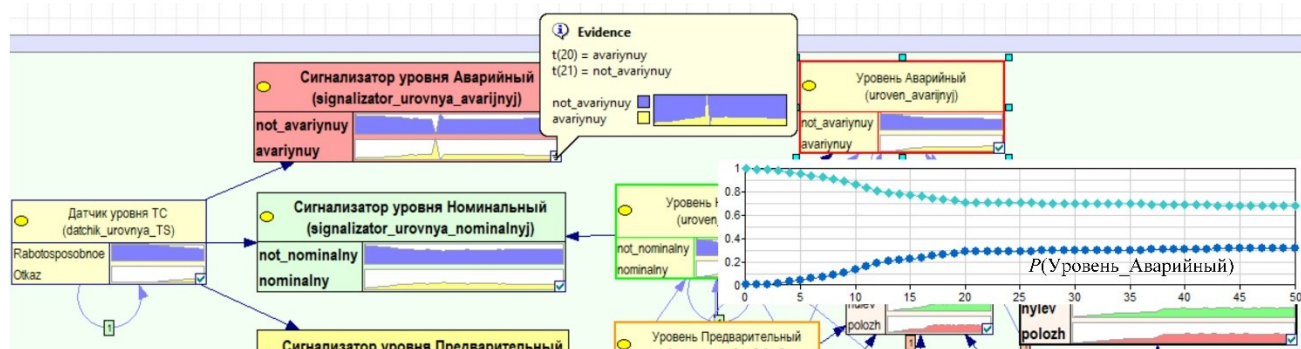


Рис. 19. График прогноза вероятности достижения предварительного уровня при отказе ЭК№4 в момент времени 10 мин

## Заключение

Таким образом, математический аппарат байесовских сетей может эффективно применяться для разработки СППР операторов АСУ ТП. Предложенный в статье вариант возможной реализации данного подхода на примере системы заправки ракеты-носителя показывает широкие возможности байесовских сетей для решения задач прогнозирования и ретроспективного анализа сложных технических систем. Учет в моделях СППР показателей надежности и диагностирования, отдельное рассмотрение отказов типа «обрыв» и «замыкание», логико-вероятностный вывод при поступлении новой информации позволяют повысить обоснованность принимаемых оператором решений.

## Список источников

1. Белозеров В.А. и др. Автоматизация технологических процессов и производств. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 284 с.
2. Кустов М.А. Изучение эффективности использования интеллектуальных материалов в композиционных структурах // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29172>
3. Быков А.П., Пиганов М.Н. Методика автономных испытаний бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=115124>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-7](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-7)

4. Чикуров В.А., Алейник В.В., Спичкина Д.Р. Методика оценивания качества выполнения операций технологического процесса подготовки и пуска ракет космического назначения при возникновении нештатной ситуации // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 21-29.
5. Перфильев А.С., Пирогов С.Ю., Семенов Е.Н. 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. Копейка А.Л. Кохановский А.Г., Тарасов А.Г. Модель функционирования автоматизированной системы подготовки и пуска ракет космического назначения для определения вероятностно-временных характеристик работоспособного состояния с учетом результатов предшествующих испытаний и деструктивных внешних воздействий // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2019. № 669. С. 266-273.
7. Голомазов А.В., Смирнов Н.Я., Иосифов П.А. Построение концепции информационной поддержки принятия решений на основе процедур человеко-машинного взаимодействия // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=107900>
8. Бобронников В.Т., Терещенко Т.С. Система поддержки принятия решений для обоснования выбора проектных параметров автономных систем энергоснабжения // Труды МАИ. 2016. № 88. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=70715>



9. Борисов В.Е., Борсоева В.В., Степанов С.М., Степнова А.И. Определение вероятности безошибочной работы диспетчера // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2018. Т. 21. № 3. С. 47-55.
10. Втюрин В.А. Компьютерные технологии в области автоматизации и управления. – СПб: СПбГЛТУ, 2011. – 103 с.
11. 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.
12. 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)
13. 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)
14. Сукар Л.Э. Вероятностные графовые модели. Принципы и приложения. - М.: ДМК Пресс, 2021. – 338 с.
15. Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В. Основы теории байесовских сетей. - СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2019. – 399 с.

16. Cowell R.G., Dawid A.P., Lauritzen S.L., Spiegelhalter D.J. Probabilistic Networks and Expert Systems, Springer-Verlag, 1999.
17. Jensen F.V. Bayesian Networks and Decision Graphs, New York, Springer-Verlag, 2001.
18. Pearl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems, Networks of Plausible Inference, New York, Morgan Kaufman Publ., 1991.
19. Тарасов А.Г., Кохановский А.Г. Автоматизация технологических процессов и производств. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2020. – 95 с.
20. GeNIe & SMILE. Decisions systems laboratory. School of Information Sciences. University of Pittsburg. URL: <http://genie.sis.pitt.edu/>
21. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
22. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. - СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
23. Дмитриев А.К. Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем. – СПб.: ВИКУ имени А.Ф. Можайского, 1999. – 171 с.
24. Дмитриев А.К. Копкин Е.В. Оценивание достоверности проверок непрерывных признаков при диагностировании технического объекта // Известия вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42. № 9. С. 3-10.
25. Дмитриев А.К, Юсупов Р.М. Идентификация и техническая диагностика. - Л.: МО СССР, 1987. – 521 с.



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

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

## References

1. Belozarov V.A. et al. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv.* (Automation of technological processes and productions), Saint Petersburg, VKA imeni A.F.Mozhaiskogo, 2014, 284 p.

2. Kustov M.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 51. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29172>

3. Bykov A.P., Piganov M.N. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115124>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-7](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-7)

4. Chikurov V.A., Aleinik V.V., Spichkina D.R. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 21-29.

5. Perfil'ev A.S., Pirogov S.Yu., Semenov E.N. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2018, no. 665, pp. 223-230.

6. Kopeika A.L. Kokhanovskii A.G., Tarasov A.G. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 669, pp. 266-273.

7. Golomazov A.V., Smirnov N.Ya., Iosifov P.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 107. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=107900>

8. Bobronnikov V.T., Tereshchenko T.S. *Trudy MAI*, 2016, no. 88. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=70715>
9. Borisov V.E., Borsoeva V.V., Stepanov S.M., Stepnova A.I. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 47-55.
10. Vtyurin V.A. *Komp'yuternye tekhnologii v oblasti avtomatizatsii i upravleniya* (Computer technologies in the field of automation and control), Saint Petersburg, SPbGLTU, 2011, 103 p.
11. Dorozhko I.V., Zakharova E.A., Osipov N.A. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii im. A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 669, pp. 216-223.
12. 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)
13. 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)
14. Sukar L.E. *Veroyatnostnye grafovye modeli. Printsipy i prilozheniya* (Probabilistic Graphical Models. Principles and Applications), Moscow, DMK Press, 2021, 338 p.
15. Tulup'ev A.L., Nikolenko S.I., Sirotkin A.V. *Osnovy teorii baiesovskikh setei* (The basics of the theory of Bayesian networks), Saint-Petersburg, Izd-vo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2019, 399 p.
16. Cowell R.G., Dawid A.P., Lauritzen S.L., Spiegelhalter D.J. *Probabilistic Networks and Expert Systems*, Springer-Verlag, 1999.
17. Jensen F.V. *Bayesian Networks and Decision Graphs*, New York, Springer-Verlag, 2001.

18. Pearl J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems, Networks of Plausible Inference*, New York, Morgan Kaufman Publ., 1991.
19. Tarasov A.G., Kokhanovskii A.G. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv* (Automation of technological processes and production: a workshop), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2020, 95 p.
20. GeNIe & SMILE. *Decisions systems laboratory. School of Information Sciences. University of Pittsburg*. URL: <http://genie.sis.pitt.edu/>
21. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* (Fundamentals of reliability theory), Saint Petersburg, BKhV-Peterburg, 2006, 702 p.
22. Ryabinin I.A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh system* (Reliability and safety of structurally complex systems), Saint Petersburg, Politekhnik, 2000, 248 p.
23. Dmitriev A.K. *Modeli i metody analiza tekhnicheskogo sostoyaniya bortovykh system* (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.
24. Dmitriev A.K. Kopkin E.V. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 1999, vol. 42, no. 9, pp. 3-10.
25. Dmitriev A.K., Yusupov R.M. *Identifikatsiya i tekhnicheskaya diagnostika* (Identification and technical diagnostics: a textbook for universities), Leningrad, MO SSSR, 1987, 521 p.
26. 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.

27. 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.

Статья поступила в редакцию 17.05.2022

Статья после доработки 19.05.2022

Одобрена после рецензирования 30.05.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 17.05.2022; approved after reviewing on 30.05.2022; accepted for publication on 25.08.2022