

Научная статья  
УДК 629.7.05  
DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)

## **МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД ОЦЕНИВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОЙ СЕТИ ДОВЕРИЯ**

**Екатерина Алексеевна Копейка<sup>1✉</sup>, Андрей Владимирович Вербин<sup>2</sup>,**

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

Санкт-Петербург, Россия

[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)<sup>✉</sup>

*Аннотация.* В статье предлагается новый методический подход к оцениванию вероятности безотказной работы (ВБР) сложной технической системы (СТС). Представлены сравнительные значения надежности ВБР СТС функционирования различных СТС, реализованные на основе байесовской сети доверия (БСД). Определены пределы избыточности аппаратных средств, получены уточненные оценки ВБР блоков СТС при получении данных об отказе блоков СТС. Полученные результаты могут быть использованы на этапе проектирования СТС, а также предоставляет возможность эксплуатирующей организации получать информацию о ВБР СТС при поступлении информации о блоках СТС, что позволяет оперативно принять решение о состоянии СТС.

**Ключевые слова:** надежность, резервирование, сложная техническая система, байесовская сеть доверия, вероятность безотказной работы, система контроля

**Для цитирования:** 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. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)

Original article

## **METHODOLOGICAL APPROACH TO ESTIMATING THE PROBABILITY OF FAILURE-FREE OPERATION OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE CHARACTERISTICS OF THE CONTROL SYSTEM BASED ON THE BAYESIAN BELIEF NETWORK**

**Ekaterina A. Kopeika<sup>1</sup>✉, Andrey V. Verbin<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Military space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia

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

**Abstract.** In developing complex technical systems together with their life cycle follow-up, the required reliability level provision is necessary. This requires developing new approaches associating reliability indicators of complex technical systems (CTS) with the checking system indicators. The article considers the possibility of accounting for the uncertainty of knowledge of the probabilistic data parameters, employed for the decisions substantiation.

The proposed approach and models are based on the basic concepts and ratios of the theory of reliability and technical systems control. The methodological approach is based on the well-known and tested apparatus of the Bayesian approach

A methodical approach, which associates the probability of reliable operation of the complex technical system elements and reliability of complex technical system checking was developed. Analysis of the results allows making conclusion on the degree of the checking process characteristics effect on probability of fault-free operation of the complex technical system.

The proposed methodological approach may be employed at the CTS design stage, and it provides an opportunity for operating organization information obtaining on the CTS fault-free operation probability when receiving information on the CTS blocks is received, which allows making operative decision on the CTS condition.

The obtained result may be of practical interested for military representatives, state certification authorities, industry representatives and may be employed while formation and justification of reliability requirements in tactical and technical tasks to develop (update) complex technical system. It may be employed as well for accounting for control process characteristics impact on the probability of the fault-free operation of the complex technical system at all stages of its life cycle.

**Keywords:** reliability, redundancy, complex technical system, Bayesian Belief Network, reliability function, control system

**For citation:** Kopeyka E.A., Verbin A.V. Methodological approach to estimating the probability of failure-free operation of complex technical systems taking into account the

characteristics of the control system based on the Bayesian Belief Network. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)

## **Введение**

В настоящее время оценивание надежности СТС является одной из важных задач [1, 2]. Надёжность СТС является одним из важных свойств от правильной работы СТС зависит успешность выполнения системой предназначенных ей задач. В соответствии с разработанным схемно-конструкторским решением рассчитываются показатели надежности, которые позволяют сделать вывод о возможности достичь требуемого уровня надежности в соответствии с техническим заданием на объект. В статье рассматривается один из способов оценивания надежности СТС с учетом использования различных видов резервирования [3] и показателями системы контроля (СК).

Под СК следует понимать совокупность программных и аппаратных средств, обеспечивающих проверку работоспособности системы, а также поиск отказавших элементов. Полученные ранее формульные зависимости для оценки надежности восстанавливаемых устройств основаны на предположении, что существует СК, которая выявляет все отказы, причем восстановление начинается незамедлительно.

Надежность резервированной СТС в большей степени зависит от надежности аппаратуры встроенного контроля. Аппаратура контроля предназначена для определения факта отказа основной аппаратуры, локализации места неисправности и выдачи команды устройству переключения на переход на резервную аппаратуру. При расчетах надежности резервированной СТС надежность аппаратуры, а также

достоверность встроенного контроля может быть учтена путем включения в расчетно-логическую схему. Таким образом, учет влияния характеристик СК на надежность СТС является актуальной. В качестве показателя надёжности будем использовать такой показатель, как ВБР СТС в течение заданного времени [4-6].

Новизна примененного методического подхода заключается:

- в учете характеристик СК в расчетах ВБР СТС в течение заданного времени;
- в учете структурной схемы надежности СТС;
- в возможности учесть дополнительные блоки.

### **Постановка задачи**

Для решения задачи выбраны БСД, которые позволяют учесть большое количество блоков СТС, характеристики СК, а также учесть влияние новой информации на ВБР СТС. Байесовские сети доверия являются одним из перспективных и удобных подходов к моделированию неопределенности в искусственном интеллекте [7, 8]. В работах [9-12] рассматриваются модели процесса диагностирования в виде агрегированных моделей, учитывающие априорную информацию в виде технического состояния объекта, однако характеристики СК на влияние ВБР СТС не рассматривались. Задача оценивания надежности ВБР СТС может быть представлена в виде БСД:

$$\langle G, \text{PAR} \rangle \tag{1}$$

где:  $G$  – ациклический направленный граф, а  $\text{PAR}$  – множество параметров, определяющих БСД. Вершинами ациклического направленного графа являются блоки СТС  $B$ , которые представлены в виде  $\mathbf{B} = \{b_i | i = \overline{1, n}\}$  для которых заданы

интенсивности отказов СТС  $\Lambda = \{\lambda_i | i = \overline{1, n}\}$  и СК, которая представлена в виде  $\mathbf{SK} = \{sk_l | l = \overline{1, k}\}$  для которой заданы метрологические характеристики  $\mathbf{A} = \{\alpha_{sk_l} | l = \overline{1, k}\}$ ,  $\mathbf{B} = \{\beta_{sk_l} | l = \overline{1, k}\}$ , являющиеся ошибками 1-го и 2-го рода (достоверность СК).

Параметрами сети **PAR** являются условные вероятности  $\{P_{soed_g} / P_{b_i} | g = \overline{1, t}, i = \overline{1, n}\}$ , связывающие блоки  $b_i$  СТС и логику соединения элементов СТС, и условные вероятности, связывающие СК  $sk_l$  и логику соединения элементов СТС  $\{P_{soed_g} / P_{sk_l} | g = \overline{1, t}, l = \overline{1, k}\}$ . Каждый блок  $b_i$  может находиться в двух состояниях:

1.  $Rabot_i$  — работоспособное состояние  $i$ -го блока  $b_i$ ;
2.  $Otkaz_i$  — отказ  $i$ -го блока  $b_i$ .

Система контроля может находиться в двух состояниях:

1.  $Rabot_l$  — работоспособное состояние  $l$ -ой СК  $sk_l$ ;
2.  $Otkaz_l$  — отказ  $l$ -ой СК  $sk_l$ .

Во время функционирования СТС происходит контроль СК, представленный в виде множества, получаемых сигналов  $Y = \{y_i | i = \overline{1, n}\}$  от датчиков блоков СТС.

Требуется оценить ВБР СТС  $P_{soed_g}^*$  при получении информации о техническом состоянии блока  $b_i$  СТС с учетом заданных характеристик СК, которую формально можно представить следующим образом:

$$P_{soed_g}^* = (P_{soed_g} / b_i = y_i^*, \alpha_{sk_l}, \beta_{sk_l}).$$

## **Методический подход оценивания вероятности безотказной работы сложных технических систем с учетом характеристик системы контроля на основе байесовской сети доверия**

Байесовские сети представляют собой графические структуры, предназначенные для отображения вероятностных отношений между огромным числом переменных и реализации вероятностного логического вывода с использованием этих переменных [13, 14]. БСД обычно используются в случае, когда имеется ряд, связанных друг с другом событий (пропозиций), вероятности истинности которых могут быть получены от специалистов предметной области. БСД должна сопоставить информацию (знания) от экспертов так, чтобы отдельные факты не противоречили друг другу. Затем принимаются во внимание фактические данные (свидетельства) о произошедших событиях или возможные вариации априорных вероятностей. Кроме того, аппарат БСД позволяет учитывать поступление новой информации – свидетельств (новых данных о результатах проверок блоков СТС или информации о структурной схеме надежности СТС). При поступлении свидетельств производится пересчет всей БСД. В большинстве случаев естественные человеческие способности не позволяют адекватно оценить влияние поступившего свидетельства и принять решение, особенно при значительном количестве объектов и связей.

Для оценивания надежности СТС с учетом характеристик СК необходимы следующие исходные данные:

- априорные данные (ВБР, интенсивность отказа, заданное время работы аппаратуры);
- данные инструментальной погрешности СК;

– данные по структурной схеме надежности СТС.

Оценивание надежности СТС с учетом характеристик СК представляет собой следующую последовательность действий:

**1. шаг.** Построить модель надежности СТС с учетом характеристик СК на основе БСД:

**1.1. шаг.** Задать топологию БСД, определить причинно – следственные связи исходя из структуры системы.

**1.2. шаг.** Задать априорную информацию для блоков СТС. Выражение, позволяющее вычислить ВБР блоков  $b_i$  СТС вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} P_{B\text{Rabot}_i} &= e^{-\lambda_i t}, \\ P_{B\text{Otkaz}_i} &= 1 - e^{-\lambda_i t}. \end{aligned} \quad (2)$$

где:  $P_{B\text{Rabot}_i}$  – вероятность того, что блок работоспособен,  $P_{B\text{Otkaz}_i}$  – вероятность отказа блока.

**1.3. шаг.** Задать априорную информацию для СК  $\{\alpha_{SK_l}; \beta_{SK_l} \mid l = \overline{1, k}\}$ .

**1.4. шаг.** Задать логику функционирования соединения элементов СТС по структурной схеме надежности.

**1.3. шаг.** Задать модель наблюдения  $\{P_{soed_g} / P_{b_{k_i}} \mid k = \overline{0, 1}; i = \overline{1, n}\}$  и  $\{P_{soed_g} / P_{SK_{k_i}} \mid i = \overline{1, k}\}$ .

**2. шаг.** Добавить свидетельство в БСД.

**3. шаг.** Оценить ВБР СТС на основе поступления новой информации – свидетельства в БСД [15, 16].



## Результаты применения методического подхода оценивания вероятности безотказной работы сложных технических систем с учетом характеристик системы контроля на основе байесовской сети доверия

На рисунке 1 приведен фрагмент структурной схемы надёжности соединения элементов СТС, соединенных последовательно (1а) и параллельно между собой (1б).

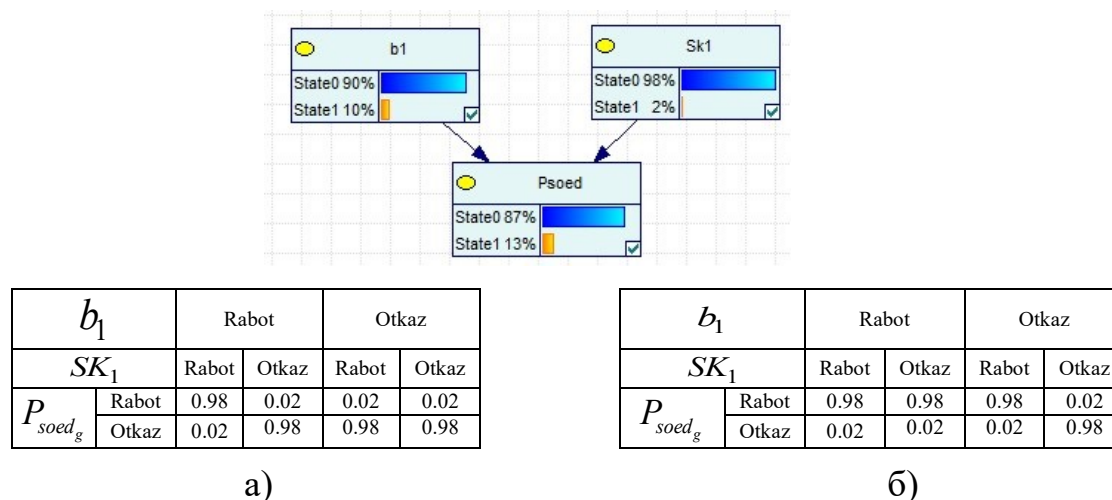


Рис. 1 Модель СТС в БСД:

- а) эквивалентная байесовская сеть СТС, имеющая последовательное соединение;
- б) эквивалентная байесовская сеть СТС, имеющая параллельное соединение

ВБР СТС представлены приведенными условными вероятностями в БСД для блоков СТС, СК, соответствующих заданию логики функционирования СТС.

Общий вид формулы для вычисления условной ВБР СТС при полученном результате об работоспособности блока  $b_1$  представлен следующим выражением:

$$P(soed_g / b_i = y_i^*) = \frac{\sum_{l=1}^k P(soed_g / b_i, SK_l) \cdot P(SK_l)}{\sum_{l=1}^k \sum_{g=1}^t P(soed_g / b_i, SK_l) \cdot P(SK_l)} \quad (3)$$

В частном случае вычисление ВБР СТС  $P(soed_0 / b_1 = y_0)$  формула (3) приобретает

вид:

$$P(soed_0 / b_1 = y_0) = \frac{P(soed_0 / b_{Rabot}, SK_{Rabot}) \cdot P(SK_{Rabot}) + P(soed_0 / b_{Rabot}, SK_{Otkaz}) \cdot P(SK_{Otkaz})}{P(SK_{Rabot}) \cdot (P(soed_0 / b_{Rabot}, SK_{Rabot}) + P(soed_1 / b_{Rabot}, SK_{Rabot})) + P(SK_{Otkaz}) \cdot (P(soed_0 / b_{Rabot}, SK_{Otkaz}) + P(soed_1 / b_{Rabot}, SK_{Otkaz}))}$$

Интенсивности отказов элементов СТС  $\lambda_i$  использованы в качестве априорной информации для БСД в виде значений  $P_B$ , вычислены по формулам (2) и имеют следующие значения:  $P(b_{Rabot})=0.9$ ;  $P(b_{Otkaz})=0.1$ ;  $P(SK_{Rabot})=0.98$ ;  $P(SK_{Otkaz})=0.02$ . При вычислении апостериорных ВБР СТС по формуле (3), совпадают с результатами, полученными при моделировании последовательного и параллельного соединения СТС, представлен на рисунке 2, что позволяет сделать вывод об адекватности разрабатываемого методического подхода. Полученная апостериорная оценка становится априорной информацией в случае поступления новой информации для следующих этапов.

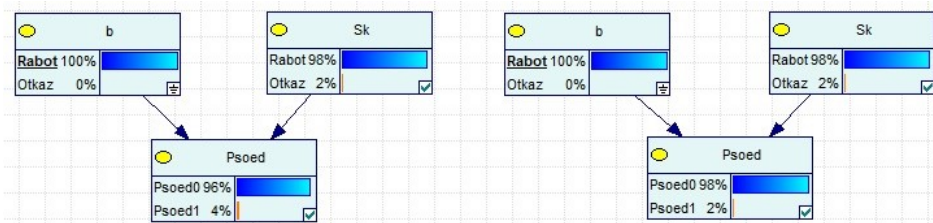


Рис. 2 Апостериорный вывод в БСД при поступлении об работоспособности блока  $b_1$  при последовательном и параллельном соединении элементов СТС

Полученные результаты на примере апостериорного вывода в БСД при различных соединениях СТС свидетельствуют о том, что логика соединения элементов СТС и показатели СК влияют на ВБР соединения элементов СТС [17, 18].

На примере структуры автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) рассмотрим способ структурного

резервирования, предусматривающий использование избыточных блоков с учетом показателей СК в БСД. При этом перестройки структуры системы не происходит, а резервные элементы участвуют в функционировании системы наравне с основными. Автоматизированные системы выполняют задачи по управлению технологическими процессами, в этом случае к самой АСУ предъявляются высокие требования по надежности [19]. Проведем сравнительное оценивание надежности вариантов одноканальной, двухканальной и трехканальной реализации АСУ ТП.

ВБР АСУ ТП за время рабочего цикла  $t_p=200$  ч определена не менее 0.995, а за время подготовки и пуска  $t_{II}=1.3$  ч не менее 0.999. Значения ВБР СТС представлены в таблице 1.

Таблица 1

Модуль	ВБР		Достоверность СК	
	$t_p$	$t_{II}$	$\alpha_{СК}$	$\beta_{СК}$
пульт оператора (ПО)	0,9998	0,999 998	0.0001	0.01
устройство гарантированного питания (УГП) ЭВМ	0,999 95	0,999 9996		
устройства ввода – вывода (УВВ)	0,998	0,999 99		
шкаф кроссовых (ШК)	0,999 996	1		
комплект кабелей (КК)	0,999 55	0,999 97		
система контроля (СК)	0.999 999			

Используя представленную информацию, проверим возможность обеспечения указанных значений ВБР АСУ ТП и сравним надежность различных вариантов ее реализации [20]. При составлении структурной схемы надежности АСУ ТП считаем, что все устройства и модули включены последовательно. ССН для одноканальной,

двухканальной и трехканальной АСУ ТП представлены на рисунках 3, 4 и 5 соответственно.

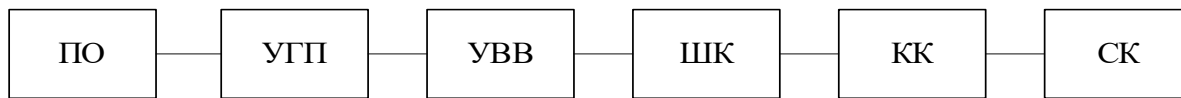


Рис. 3 Структурная схема надежности для одноканальной АСУ ТП

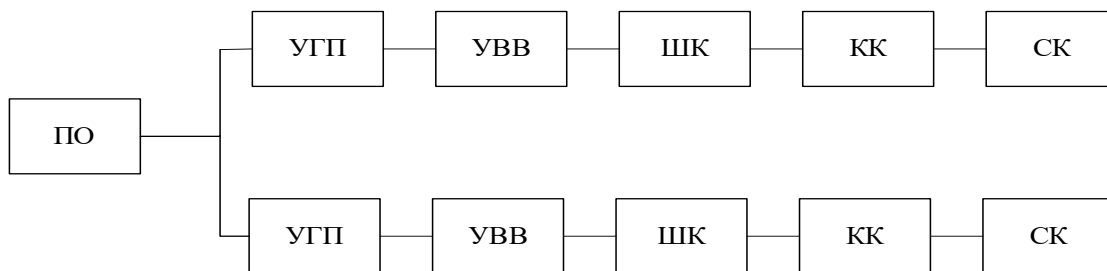


Рис. 4 Структурная схема надежности для двухканальной АСУ ТП

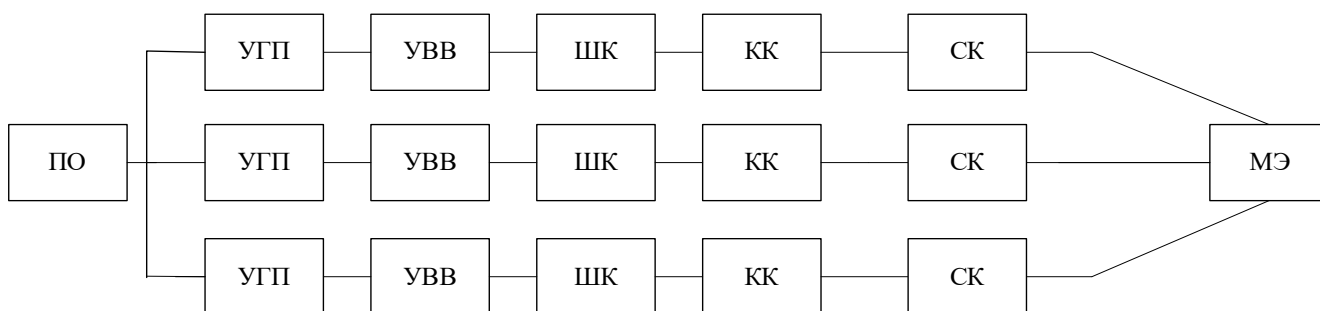


Рис. 5 Структурная схема надежности для трехканальной АСУ ТП

В трехканальной АСУ ТП сигналы с выходов отдельных каналов поступают на мажоритарный элемент (МЭ) (рис. 5), который является избирателем, производящим «голосование» [21]. Мажоритарный элемент используется для создания отказоустойчивых систем на выходе которого при совпадении сигналов от двух из трех резервных каналов появляется сигнал. Выход из строя одного из трех каналов приводит к искажению выходного сигнала. Использование мажоритарного способа резервирования позволяет достаточно просто обнаружить неисправный канал.

На рисунке 6 показана структура БД для одноканальной АСУ ТП, что соответствует рисунку 3, смоделированной в среде построения БД GeNe.

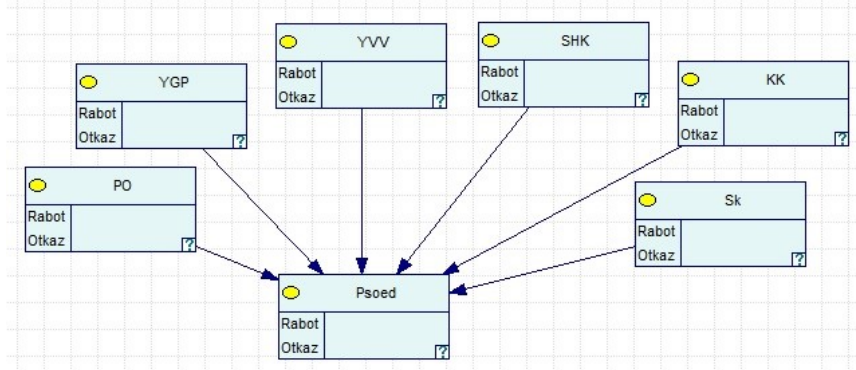


Рис. 6 БД доверия одноканальной АСУ ТП в GeNe

В таблице 2 приведены задание параметров (условных вероятностей:  $\{P_{soed_g} / P_{b_{ki}} \mid k = \overline{0,1}; i = \overline{1,n}\}$  и  $\{P_{soed_g} / P_{SK_{ki}} \mid i = \overline{1,k}\}$ ) для одноканальной АСУ ТП.

Таблица 2

ПО		Rabot								Otkaz							
УТП		Rabot								Otkaz							
УВВ		Rabot				Otkaz				Rabot				Otkaz			
ШК		Rabot		Otkaz		Rabot		Otkaz		Rabot		Otkaz		Rabot		Otkaz	
КК		Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz
СК		Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz	Rabot	Otkaz
$P_{soed_k}$	Rabot	0.9999	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Otkaz	0.0001	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

Аналогично строится БД для двухканальной и трехканальной АСУ ТП.

Значение ВБР СТС для одноканальной АСУ ТП при заданных характеристиках:

$$\alpha_{SK}=0.0001, \beta_{SK}=0.01, t_p=168 \text{ ч.}, P_{soed_1}=0.99722384, \text{ а для } t_{II}=1.5 \text{ ч.}, P_{soed_2}=0.99985743.$$

Полученные значения ВБР позволяют провести сравнительное оценивание показателей безотказности при различных реализациях АСУ ТП. Выигрыш в надежности будем оценивать по формулам:

$$A_1 = \frac{P_{soed_2}}{P_{soed_1}}, \quad A_2 = \frac{P_{soed_3}}{P_{soed_1}} \quad (4)$$

Значения отношений  $A_1$  и  $A_2$  представлены в таблице 3.

Таблица 3

Время, ч	Показатели СК		Выигрыш	
	$\alpha_{СК}$	$\beta_{СК}$	$A_1$	$A_2$
168 ч	0.0001	0.01	1.002 50	1.002 47
1.3 ч			1.000 03	0.999 83

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Заданные состав, структура АСУ ТП, показатели безотказности отдельных устройств и модулей обеспечивают достижение требуемых значений ВБР за установленное время рабочего цикла и время подготовки и пуска РН.

2. Выигрыш в надежности двухканальной и трехканальной АСУ ТП практически одинаков, что обуславливает нецелесообразность чрезмерной аппаратной избыточности в структуре АСУ, т.е. использование третьего канала управления нецелесообразно.

3. Многоканальная реализация АСУ ТП функционирует более эффективно в смысле надежности в течение длительных интервалов времени.

4. При показателях СК  $\alpha_{СК}=0.01$ ,  $\beta_{СК}=0.01$  ВБР СТС за установленное время рабочего цикла 168 ч. составляет 0.9873, что не удовлетворяет достижению

требуемых значений, а при  $\alpha_{СК}=0.0001$ ,  $\beta_{СК}=0.02$  показатель ВБР СТС за установленное время рабочего цикла 168 ч. составляет 0.9972, что позволяет сделать вывод, что ошибка СК  $\alpha_{СК}$  более чувствительна к определению ВБР по различным схемам надежности СТС.

Таким образом, подход к определению надежности СТС с учетом СК могут быть использованы на этапе проектирования СТС при выборе рациональной структуры аппаратной части, определении разумных пределов избыточности аппаратных средств.

### **Заключение**

Применение методов программного моделирования в GeNie позволяет не только снизить затраты на проведение экспериментов, но и значительно повысить оперативность расчетов. Результаты моделирования на основе разработанного методического подхода позволяют перейти к решению широкого спектра прикладных задач, к которым можно отнести:

1) Разработка перспективных и доработка существующих СТС с учетом показателей контроля СТС.

2) Формирование требований к метрологическим характеристикам СК и показателям контроля СТС в целом, обеспечивающий необходимый уровень резервирования.

## Список источников

1. Захарова Е.А., Дорожко И.В., Копейка А.Л. Имитационная модель для оценивания показателей надежности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 490-498.
2. Глазунов Л.П. Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надежности автоматических систем. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
3. Гуменюк В.М. Надежность и диагностика электротехнических систем. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2010. – 218 с.
4. ГОСТ 27.002-15. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.
5. Барановский А.М., Дорожко И.В., Тарасов А.Г. Оценка надежности структурно-сложных технических комплексов с помощью моделей байесовских сетей доверия в среде GeNIe // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2015. № 3. С. 36-45.
6. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=67501>
7. Бидюк П.И., Терентьев А.Н., Гасанов А.С. Построение и методы обучения байесовских сетей // Кибернетика и системный анализ. 2005. № 4. С. 133-147.
8. Джордж Ф. Люгер. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / пер. с англ. - М.: Вильямс, 2003. - 864 с.
9. Дорожко И.В., Горохов Г.М., Кириллов И.А. Методический подход к разработке принятия решений оператора автоматизированной системы управления



технологическими процессами на основе динамических байесовских сетей // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168195>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-23)

10. Дорожко И.В., Кочанов И.А., Осипов Н.А., Бутырин А.В. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. № 652. С. 137-146.

11. Захарова Е.А., Копейка А.Л., Кузнецов А.Б., Шавин А.С. Модель прогнозирования надежности автоматизированных систем с учетом этапов эксплуатации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 424-430.

12. Дорожко И.В., Осипов Н.А., Захарова Е.А. Модель для оценки вероятности безотказной работы сложных технических комплексов на основе динамических байесовских сетей // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2019. № 652. С. 303-313.

13. Масленников Е.Д., Сулимов В.Б. Предсказания на основе байесовских сетей доверия: алгоритм и программная реализация // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 10. С. 94-107.

14. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход / пер. с англ. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.

15. Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В. Байесовские сети: логико-вероятностный подход. – СПб.: Наука, 2006. – 607 с.

16. Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В. Основы теории байесовских сетей. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2019. – 399 с.

17. Бочкарев С.В., Цаплин А.И. Диагностика и надежность автоматизированных систем. – Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2008. – 485 с.
18. Миронов А.Н., Дорохов А.Н. и др. Метрологическое обеспечение эксплуатации вооружения и военной техники. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2009. – 755 с.
19. Полянский В.И., Аверьянов А.В., Данилов А.И. и др. Автоматизированные системы управления подготовкой и пуском ракет космического назначения. - СПб: ВИКА им. А. Ф. Можайского, 1997. - 332 с.
20. Аверьянов А.В. Оценивание надежности автоматизированных систем управления подготовкой и проведением пуска космического аппарата // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. № 4 (52). С. 62–65.
21. Пакулов Н.И., Уханов В.Ф., Чернышов П.Н. Мажоритарный принцип построения надежных узлов и устройств ЦВМ. - М.: Советское радио, 1974. - 184 с.

## References

1. Zakharova E.A., Dorozhko I.V., Kopeika A.L. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 10, pp. 490-498.
2. Glazunov L.P. Grabovetskii V.P., Shcherbakov O.V. *Osnovy teorii nadezhnosti avtomaticheskikh system* (Fundamentals of the theory of reliability of automatic systems), Leningrad, Energoatomizdat, 1984, 208 p.
3. Gumenyuk V.M. *Nadezhnost' i diagnostika elektrotekhnicheskikh system* (Reliability in technology. Basic concepts. Terms and definitions), Vladivostok, Izd-vo DVG TU, 2010, 218 p.

4. *Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya. GOST 27.002-15* (Reliability in the technician. The basic concepts. Terms and definitions. GOST 27.002-15), Moscow, Standartinform, 2016, 24 p.
5. Baranovskii A.M., Dorozhko I.V., Tarasov A.G. *Intellektual'nye tekhnologii na transporte*, 2015, no. 3, pp. 36-45.
6. Lubkov N.V., Spiridonov I.B., Stepanyants A.S. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67501>
7. Bidyuk P.I., Terent'ev A.N., Gasanov A.S. *Kibernetika i sistemnyi analiz*, 2005, no. 4, pp. 133-147.
8. Dzhordzh F. Lyuger. *Iskusstvennyi intellekt: strategii i metody resheniya slozhnykh problem* (Artificial Intelligence Structures and Strategies for Complex Problem Solving), Moscow, Vil'yams, 2003, 864 pp.
9. Dorozhko I.V., Gorohov G.M., Kirillov I.A. *Trudy MAI*, 2022, no. no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168195>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-23)
10. Dorozhko I.V., Kochanov I.A., Osipov N.A., Butyrin A.V. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2016, no. 652, pp. 137-146.
11. Zakharova E.A., Kopeika A.L., Kuznetsov A.B., Shavin A.S. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 10, pp. 424-430.
12. Dorozhko I.V., Osipov N.A., Zakharova E.A. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2019, no. 652, pp. 303-313.
13. Maslennikov E.D., Sulimov V.B. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*, 2010, vol. 10, pp. 94-107.

14. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyi intellekt: sovremennyyi podkhod* (Artificial Intelligence A Modern Approach), Moscow, Vil'yams, 2006, 1408 p.
15. Tulup'ev A.L., Nikolenko S.I., Sirotkin A.V. *Baiesovskie seti: logiko-veroyatnostnyi podkhod* (Bayesian networks: logic-probabilistic approach), Saint Petersburg, Nauka, 2006, 607 p.
16. 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.
17. Bochkarev S.V., Tsaplin A.I. *Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem* (Diagnostics and reliability of automated systems), Perm', Izd-vo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008, 485 p.
18. Mironov A.N., Dorokhov A.N. et al. *Metrologicheskoe obespechenie ekspluatatsii vooruzheniya i voennoi tekhniki* (Metrological support for the operation of weapons and military equipment), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2009, 755 p.
19. Polyanskii V.I., Aver'yanov A.V., Danilov A.I. et al. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya podgotovkoi i puskom raket kosmicheskogo naznacheniya* (Automated control systems for the preparation and launch of space rockets), Saint Petersburg, VIKa im. A. F. Mozhaiskogo, 1997, 332 p.
20. Aver'yanov A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2008, no. 4 (52), pp. 62–65.
21. Pakulov N.I., Ukhanov V.F., Chernyshov P.N. *Mazhoritarnyyi printsip postroeniya nadezhnykh uzlov i ustroystv TsVM* (The majority principle of building reliable components and devices of the digital computer), Moscow, Sovetskoe radio, 1974, 184 p.

Статья поступила в редакцию 16.01.2023

Одобрена после рецензирования 26.01.2023

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 16.01.2023; approved after reviewing on 26.01.2023; accepted for publication on 27.02.2023