

Научная статья

УДК 681.5

DOI: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177670>

## **АЛГОРИТМ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ ТИПА «КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ» В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ СЛОЖНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ**

**Анатолий Михайлович Барановский<sup>1</sup>, Анатолий Сергеевич Мусиенко<sup>2✉</sup>,  
Николай Романович Шулика<sup>3</sup>**

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

Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>[yka@mil.ru](mailto:yka@mil.ru)✉

***Аннотация.*** Рассматривается задача поиска одиночных дефектов в электрических цепях различного типа сложных автоматизированных систем управления (АСУ) таких как АСУ подготовкой и пуском ракет космического назначения (РКН). Дефекты проявляются в виде модели дефекта типа «короткое замыкание» (КЗ). Предлагается алгоритм поиска, сокращающий число шагов поиска в рамках комбинированной стратегии разбиений исходного множества возможных дефектов (пар цепей), включающей принцип половинного разбиения и последовательного перебора. Показано, что в отличие от известных стратегий (полного перебора, половинного разбиения и известных смешанных) предлагаемая стратегия позволяет

не только обнаружить наличие дефекта в цепях объекта контроля, но и выявить цепи, имеющие сообщение между собой, за минимальное количество шагов проверок.

Полученные результаты целесообразно использовать при разработке устройств контроля электрооборудования наземных и бортовых систем, обеспечивающих контроль и поиск дефектов при подготовке РКН к запуску.

**Ключевые слова:** электрические цепи, модель, контроль технического состояния, сложные технические системы, короткое замыкание, дефекты, отказы

**Для цитирования:** Барановский А.М., Мусиенко А.С., Шулика Н.Р. Алгоритм поиска дефектов типа «короткое замыкание» в электрических цепях кабельной сети сложной автоматизированной системы // Труды МАИ. 2023. № 133. DOI: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177670>

Original article

## **ALGORITHM FOR SEARCHING FOR DEFECTS SUCH AS “SHORT CIRCUIT” IN THE ELECTRICAL CIRCUITS OF THE CABLE NETWORK OF A COMPLEX AUTOMATED SYSTEM**

**Anatoly M. Baranovsky<sup>1</sup>, Anatoly S. Musienko<sup>2✉</sup>, Nikolai R. Shulika<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

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

**Abstract.** In complex automated control systems (ACS), specifically in the control systems of the space-intended rockets (SIR) singular defects manifest themselves in the form of short

circuit in the electric circuits. The authors propose a new search algorithm, which reduces the number of search steps through a combined strategy of partitioning the initial set of possible defects.

The strategy being proposed includes the principle of half-partitioning and sequential enumeration of possible defects. It differs from the well-known strategies, such as exhaustive search, half-partitioning and mixed strategy, allowing not only detecting the presence of a defect, but identifying specific circuits that communicate with each other with a minimum number of checking steps as well.

The obtained research results of the study can be employed in the development of monitoring devices for electrical equipment of ground and on-board systems, which ensure monitoring and detection of defects during the preparation of the SIR for launch. Both external and internal factors may cause changes in the technical condition of electrical circuits during operation. Defects, especially short circuits between the circuits, are especially dangerous and do not allow for the safe operation of the products.

The purpose of the study consists in reducing the number of check steps to detect the fact of the short circuit absence and indicate the circuits numbers that have a short circuit between them, in the event of a short circuit being detected in electrical circuits.

The authors propose to employ original heuristic algorithm for generating sets of tested circuits to achieve this goal. This algorithm allows generating a terminal minimum set of pairs of circuits with supposed presence of the short circuit. This approach reduces the number of necessary pairwise checks at the stage of sequential enumeration of the checked pairs of circuits.

In conclusion, the proposed strategy for the single defects searching in electrical circuits is the best one, since it requires fewer elementary tests to monitor and search for the short circuits. Such strategy realization is relatively simple with modern control tools based on computing and switching devices. The assumption of a single short circuit is acceptable for normal operating conditions, but in case of deviations a repeated round of checks is necessary.

**Keywords:** electrical circuits, model, technical condition monitoring, complex technical systems, short circuit, defects, failures

**For citation:** Baranovsky A.M., Musienko A.S., Shulika N.R. Algorithm for searching for defects such as “short circuit” in the electrical circuits of the cable network of a complex automated system. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. DOI: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177670>

## Введение

В процессе эксплуатации изделий, имеющих в своем составе разветвленную сеть электрических цепей, под воздействием различных внешних и внутренних факторов могут происходить изменения технического состояния электрических цепей [1]. В результате появляются дефекты, не позволяющие обеспечить дальнейшую безопасную эксплуатацию изделий. Особенно опасны дефекты, выражающиеся в нарушении сопротивления изоляции цепей – уменьшение сопротивления изоляции и появление сообщения между цепями (короткого замыкания – КЗ).

Рассмотрим функционирование системы контроля (СК), включающей АСУ как объект контроля (ОК), содержащую разветвленную кабельную сеть (КС), и средство контроля (СрК), представленные на рис. 1.

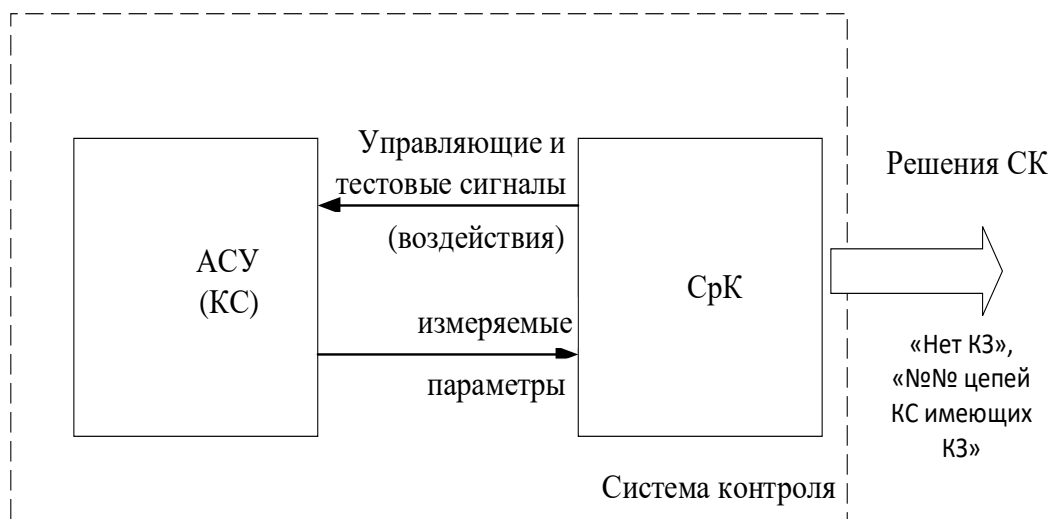


Рисунок 1 – Схема контроля кабельной сети АСУ

СрК позволяют выполнять коммутацию проверяемых электрических цепей (ЭЦ) в различных сочетаниях и подключать ЭЦ к измерителю сопротивлений для контроля наличия коротких замыканий в ЭЦ. В ходе контроля на ЭЦ выдаются тестовые сигналы (воздействия) в виде уровней напряжений, а от ЭЦ на СрК подаются измеряемые параметры (токи в ЭЦ), по которым определяются дефекты типа КЗ. Функционирование СК представляет собой множество последовательных коммутаций и измерений. Количество таких шагов определяется выбранной стратегией разбиений множества проверяемых цепей на подмножества цепей, проверяемых на каждом шаге. Мощность множества возможных дефектов типа «короткое замыкание – КЗ» возрастает в квадратичной зависимости от числа цепей. На практике, как правило, используются устройства контроля и поиска этого типа

дефектов, реализующие процедуры полного перебора или специальных разбиений на подмножества, между которыми осуществляются тестовые проверки на сообщение [1,2]. Основная цель разбиений на подмножества – сокращение числа проверок. Известные стратегии половинного разбиения в большинстве случаев позволяют выявить отсутствие КЗ между цепями, но не позволяют указать цепи, имеющие между собой сообщение при выявлении факта наличия КЗ между множествами цепей. В работах [1,3] рассмотрены основные подходы и устройства, позволяющие реализовать процедуры контроля и поиска дефектов типа КЗ в электрических цепях, применяемые в средствах подготовки и пуска РКН. Главным их недостатком является значительное число шагов (элементарных проверок) для решения задачи.

Цель исследования – сократить количество шагов проверок не только для выявления факта отсутствия КЗ, но и указания номеров цепей, имеющих между собой КЗ, в случае обнаружения КЗ в ЭЦ. Допущение – в кабельной сети возможен только один дефект типа КЗ. Такое допущение является оправданным для высоконадежных АСУ, например, АСУ подготовкой и пуском РКН. Для уменьшения числа шагов предлагается использовать оригинальный эвристический алгоритм формирования множеств проверяемых цепей, позволяющий сформировать терминальное минимальное множество пар цепей, подозреваемых на наличие КЗ. Это позволяет сократить процесс попарных проверок на этапе последовательного перебора проверяемых пар цепей.

## **Постановка задачи контроля и поиска пар цепей, имеющих сообщение между собой**

Рассматривается некоторый объект контроля (например, АСУ подготовкой и пуском РКН), в составе которого имеется  $n$  электрических цепей ( $\text{Ц}_i, i=0,1, \dots, n-1$ ). Между цепями возможны константные неисправности типа короткое замыкание (КЗ). Полагается, что ввиду высокой надежности изделия, возможен одиночный отказ электрических цепей типа КЗ, т.е. из всех возможных пар цепей только две цепи могут иметь между собой сообщение (КЗ).

Необходимо, используя коммутации цепей и проверки с помощью устройств типа «грубый тестер» (индикатор наличия КЗ), обнаружить и найти дефект – определить номера цепей, имеющих КЗ между собой.

Известные способы контроля разобщенности ЭЦ можно свести к трем стратегиям проверок [14, 13]:

1. Каждая цепь проверяется с каждой другой на наличие КЗ (полный последовательный перебор);
2. Каждая цепь проверяется на наличие КЗ со всеми остальными цепями (принудительно замкнутыми на одну шину измерений);
3. Групповой контроль КЗ на основе половинного разбиения всего множества контролируемых цепей (проверка наличия КЗ между двумя группами цепей, множества которых варьируются на каждом шаге контроля).

Сущность способов сводится к следующим положениям. Пусть проверяемая система (объект контроля) представляет собой кабель, состоящий из  $n$  цепей (жил

кабеля). Проверку разобщенности ЭЦ в этом случае нетрудно осуществить с помощью устройств, представляющих собой грубый тестер (рисунок 2).

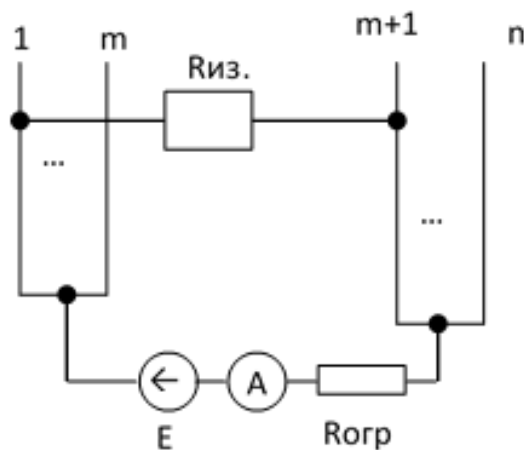


Рисунок 2 - Схема грубого тестера

На рисунке показан случай, когда первая цепь проверяется на сообщение с  $(m+1)$ -ой цепью кабеля. Между ними должно быть сопротивление изоляции  $R_{из.}$ . При проверке подается напряжение от источника  $E$  и измеряется ток амперметром  $A$ . Поскольку при отсутствии короткого замыкания (КЗ) сопротивление изоляции  $R_{из.}$  велико (сотни кОм, мОм), то токи через ограничивающее сопротивление  $R_{огр}$  малы.

Например, при  $E=30\text{В}$  и  $R_{изол}=30\text{ кОм}$  и  $I \approx \frac{E}{R_{иизо.}} = \frac{30\text{ В}}{30\text{ кОм}} = 1\text{ мА}$ .

При КЗ ( $R_{изол}=0\text{ Ом}$  и ограничивающем сопротивлении  $R_o=30\text{ Ом}$ ) токи будут значительно больше  $I_{кз} = \frac{30\text{ В}}{R_o} \approx \frac{30\text{ В}}{30\text{ Ом}} = 1\text{ А}$ .



Поэтому высокой точности измерителя и стабильности источника Е не требуется [4-6, 9]. Однако, число операций элементарных проверок может быть очень большим и зависит от способа контроля.

Рассмотрим возможные способы контроля разобщенности жил кабеля. Пусть их число (число цепей) равно  $n$ . Требуется проверить отсутствие замыканий между каждой парой цепей. Измерительный прибор и источник один (тестер). Жилы кабеля можно с помощью коммутации соединять в любом сочетании.

1-й способ (каждая жила проверяется на наличие КЗ с каждой другой): Число проверок

$$K_{\text{пр}} = C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2} \approx \frac{n^2}{2}, \quad (1)$$

при  $n = 100$ :  $K_{\text{пр}} \cong 5000$ .

Если на одну проверку отводить 1 секунду (для окончания переходных процессов, которые имеют место из-за межпроводных емкостей и индуктивностей цепей), то на это уйдет время:  $t_1 = \frac{5000}{3600} \approx 1,4$  час.

2-й способ (каждая жила кабеля проверяется на разобщенность со всеми остальными цепями кабеля). При этом способе на первом шаге проверяется сопротивление между первой жилой и остальными  $(n-1)$  жилами кабеля, принудительно замкнутыми на одну шину. На втором – между второй и остальными  $(n-2)$  жилами. На третьем – между третьей и остальными  $(n-3)$  жилами кабеля и т.д.

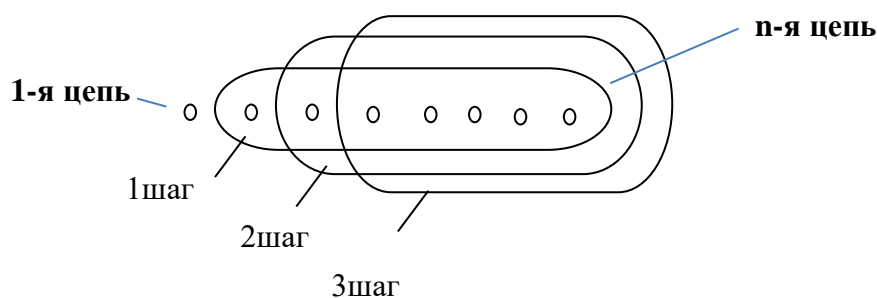


Рисунок 3 - Схема шагов проверок по второму способу

Всего понадобится  $n-1$  шагов проверок. Время проверок при тех же

допущениях:  $t_2 = \frac{99}{60} \approx 1,65$  мин.

Такое сокращение времени произошло потому, что при втором способе проверялась на каждом шаге большая доля из возможных дефектов типа КЗ.

3-й способ проверки разобщенности ЭЦ (оптимального группового разбиения). Для уменьшить число проверок можно разбить цепи на две части. Например, выделить группу из « $m$ » жил. Тогда, в другой группе останется « $n-m$ » жил. Будем проверять сопротивление изоляции между группами (рисунок 2 – цепи каждой группы замкнуты на общую шину измерений) [3, 7].

Если все цепи разделить пополам на две группы, то на первом шаге будет проверено  $\left(\frac{n}{2}\right)^2$  неисправностей типа КЗ, что составляет половину от  $C_n^2$  - всех возможных дефектов типа КЗ. По-видимому, от оставшейся половины в лучшем случае сразу можно проверить половину. И это можно сделать, если разделить жилы кабеля первых двух групп пополам и объединить половины каждой исходной группы

вместе на одну шину. На следующем шаге полученные группы цепей еще раз разбиваем пополам и объединяем на разные шины измерений. Повторяя процедуру разбиений исходных множеств до тех пор, пока останется по одной цепи в текущем подмножестве, можно добиться контроля разобщенности всех цепей: если все проверки завершились успешно (КЗ не обнаружено). Вариант разбиений при общем количестве цепей в кабеле  $n = 15$  показан на рисунке 4.

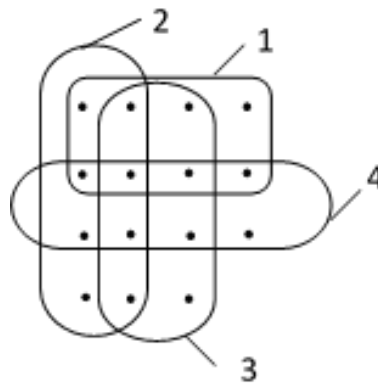


Рисунок 4 - Разбиения 15 цепей на два множества на шагах 1-4.

Общее число шагов проверок контроля отсутствия коротких замыканий будет определяться выражением  $K_{\text{пр}} = \log_2 n$ .

$$K_{\text{пр}} = \log_2 n, \quad (2)$$

если число  $K_{\text{пр}} = \log_2 n$  будет не целым числом, то необходимо выполнить округление до большего целого [16,19].

Однако в этом случае получим только информацию о наличии (отсутствии) коротких замыканий в электрических цепях. Если хотя бы одна проверка завершится выявлением короткого замыкания между проверяемыми множествами цепей на текущем шаге, то встает задача поиска цепей, имеющих замыкание между собой.

Рассмотрим вариант решения этой задачи при допущении, что имеется только одно короткое замыкание между двумя произвольными цепями.

### Алгоритм решения задачи

Для решения задачи предлагается новая стратегия контроля и поиска коротких замыканий  $W^{(pin)} = \langle \text{разбиение } 1, \text{ разбиение } 2, \dots, \text{ разбиение } k; \text{ перебор} \rangle$ , предполагающая на первом этапе (контроль отсутствия КЗ) последовательность  $k$  разбиений всех цепей на два равных множества на каждом шаге контроля (как в 3-м способе) и на основе результатов каждой проверки формирование множества пар цепей подозреваемых на наличие КЗ между ними, которое выявляется путем последовательного перебора проверок пар цепей сформированного множества [3, 8].

Для формализации предлагаемой стратегии, позволяющей автоматизировать процессы на основе применения вычислительных средств, введем в рассмотрение следующие элементы [9,13]:

- двоичный номер электрической цепи  $\Pi_i: Z^{(i)} = z_1^{(i)} z_2^{(i)} \dots z_k^{(i)}$ ,  $i=0,1, \dots, n-1$ ;  $k$  – число разрядов кода в двоичной системе счисления, достаточное для представления наибольшего номера электрической цепи изделия (например, если рассматривается 100 цепей, то  $Z^{(100)} = z_1^{(100)} z_2^{(100)} \dots z_k^{(100)}$ ,  $k=7$ , так как  $2^k = 2^7 = 128 > 100$  и, соответственно,  $Z^{(100)} = 1100100$ ).

- множества возможных пар цепей  $M^{(v)} = \{(\Pi_i + \Pi_j) \mid z_{(i)} \oplus z_{(j)} = v\}$ ,  $v$  - двоичный код чисел от 0 до  $(2^k - 1)$ . Множество  $M^{(v)}$  будет включать пары цепей, сумма по модулю

2 введенных выше двоичных номеров которых будет равна  $\nu$ . Например, цепи с номерами 100 и 99 попадут в множество

$$M^{(7)}, \text{ так как } Z^{(100)} \oplus Z^{(99)} = 7.$$

На каждом шаге контроля будем формировать два множества

$$A_{\mu} = \{\Pi_i\}_{z_{\mu}^{(i)}=0}; \quad B_{\mu} = \{\Pi_j\}_{z_{\mu}^{(j)}=1}; \quad i, j = 0, 1, \dots, h-1, \quad \mu = 1(1)k.$$

На каждом шаге  $\mu = 1(1)k$  проверяем наличие КЗ между  $A_{\mu}$  и  $B_{\mu}$ .

Формируем двоичный код результатов

$$D_r = d_1^{(r)} d_2^{(r)} \dots d_k^{(r)}, \quad r = 0(1)2^k - 1, \quad \text{где } d_p^{(r)} = 1, \text{ если есть КЗ, в противном случае } d_p^{(r)} = 0.$$

По коду  $D_r$  выбираем соответствующее ( $r = \nu$ ) множество  $M^{(\nu)}$  подозреваемых пар цепей ( $M^{(0)}$  – пустое: КЗ нет).

Максимальная мощность множеств  $M^{(\nu)} \quad m = n/2$ .

Число шагов стратегии:

- на контроль:  $k_{\text{кон}} = -\lceil -\log_2 n \rceil$ ,  $\lceil - * \rceil$  – округление до большего;

- наибольшее число шагов на поиск:  $k_{\text{поиск}} = n/2 - 1$ ,

- наибольшее общее число шагов [15,20]:

$$K_{\text{кп}} = -\lceil -\log_2 n \rceil + n/2 - 1, \quad (3)$$

для  $n=100$  число шагов на контроль и поиск  $K_{\text{кп}} = 7 + 56$  (зависит от номеров цепей, имеющих КЗ).

Для стратегии прямого перебора пар цепей  $W^{(n)}$  (1-й способ) число шагов  $K_{\text{кп}} = n^2/2 = 5000$ .

Для стратегии  $W^{(m)}$  деления (каждая цепь с остальными – 2-й способ) –  $K_{\text{кп}}=n-1=99$ .

### **Заключение**

1. Предложенная стратегия является лучшей, так как требует меньшее количество шагов элементарных проверок на осуществление контроля и поиска коротких замыканий электрических цепей.

2. Реализация стратегии легко осуществляется современными средствами контроля на основе вычислительных устройств и устройств коммутации [10].

3. Принятое допущение о единственном КЗ является приемлемым для новой кабельной продукции и систем, эксплуатируемых в нормальных условиях. Невыполнение допущения приведет к необходимости проведения повторных циклов проверок.

### **Список источников**

1. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. ГОСТ Р 27.102-2021. – М.: ФГБУ «РСТ», 2021. – 45 с.
2. 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>

3. Дорожко И.В., Копейка А.Л., Осипов Н.А. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования технического состояния // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2019. № 671. С. 303-313.
4. Техническая диагностика. Термины и определения: ГОСТ В 20.911-89. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 12 с.
5. Ключева В.В. и др. Технические средства диагностирования: справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 671 с.
6. Бочкарев С.В., Цаплин А.И. Диагностика и надежность автоматизированных систем. – Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2008. – 485 с.
7. Гуменюк В.М. Надежность и диагностика электротехнических систем. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного государственного технического университета, 2010. – 218 с.
8. Гусеница Я.Н., Дорожко И.В., Кочанов И.А., Петухов А.Б. Научно-методический подход к оцениванию готовности сложных технических комплексов с учетом метрологического обеспечения // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90383>
9. Черников А.А. Алгоритм обнаружения и классификации объектов на неоднородном фоне для оптико-электронных систем // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173039>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-26](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-26)

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. 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)
12. 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>
13. Привалов А.Е., Дорожко И.В., Захарова Е.А., Копейка А.Л. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических систем с учетом характеристик процесса диагностирования // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=101526>
14. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. - СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
15. Барановский А.М. Диагностирование коротких замыканий электрических цепей // НТК «Проблемные вопросы проектирования и эксплуатации бортовых и наземных систем управления объектов ракетно–космической техники РВСН: тезисы докладов. - СПб: МО РФ, 1999. С. 89.



16. Захарова Е.А., Барановский А.М. Модель оценивания готовности сложных технических систем с учетом показателей качества диагностирования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 669. С. 124–132.
17. 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.
18. Копкин Е.В., Чикуров В.А., Алейник В.В., Лазутин О.Г. Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации // Труды СПИИРАН. 2015. № 4 (41). С. 106-130.
19. Минаков Е.П., Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю. Модель оценивания эффективности управления многоспутниковыми орбитальными системами // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168196>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-24)
20. Тарасов А.Г., Миляев И.К., Мусиенко А.С. Модель оценки коэффициента готовности электрических кабельных систем космических средств, учитывающая особенности определения технического состояния // Труды МАИ. 2023, no. 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175923>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-17)

## References

1. *Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob"ekta. Terminy i opredeleniya. GOST R 27.102-2021* (Reliability in technology. Reliability of the object. Terms and definitions: GOST R 27.102-2021), Moscow, FGBU «RST», 2021, 45 p.

2. Vorontsov V.A., Fedorov E.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58817>
3. Dorozhko I.V., Kopeika A.L., Osipov N.A. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 671, pp. 303-313.
4. *Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya: GOST V 20.911 89.* (Technical diagnostics. Terms and definitions: GOST V 20.911 89.), Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1990, 12 p.
5. Klyueva V.V. et al. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya* (Klyueva V.V. and others. Technical diagnostic tools: reference), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 671 p.
6. Bochkarev S.V., Tsaplin A.I. *Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh system* (Bochkarev S.V., Tsaplin A.I. Diagnostics and reliability of automated systems), Perm', Izd-vo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008, 485 p.
7. Gumenyuk V.M. *Nadezhnost' i diagnostika elektrotekhnicheskikh sistem* (Gumenyuk V.M. Reliability and diagnostics of electrical systems), Vladivostok, Izd-vo Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2010, 218 p.
8. Gusenitsa Ya.N., Dorozhko I.V., Kochanov I.A., Petukhov A.B. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90383>
9. Chernikov A.A. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173039>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-26](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-26)
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. 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)
12. Lubkov N.V., Spiridonov I.B., Stepanyants A.S. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67501>
13. Privalov A.E., Dorozhko I.V., Zakharova E.A., Kopeika A.L. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=101526>
14. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* (Polovko A.M., Gurov S.V. Fundamentals of reliability theory), Saint Petersburg, BKhV-Peterburg, 2006, 702 p.
15. Baranovskii A.M. *NTK «Problemnye voprosy proektirovaniya i ekspluatatsii bortovykh i nazemnykh sistem upravleniya ob"ektov raketno–kosmicheskoi tekhniki RVSN: tezisy dokladov*. Saint Petersburg, MO RF, 1999, pp. 89.
16. Zakharova E.A., Baranovskii A.M. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2019, no. 669, pp. 124–132.
17. Dorozhko I.V., Kochanov I.A., Osipov N.A., Butyrin A.V. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2016, no. 652, pp. 137–146.
18. Kopkin E.V., Chikurov V.A., Aleinik V.V., Lazutin O.G. *Trudy SPIIRAN*, 2015, no. 4 (41), pp. 106-130.
19. Minakov E.P., Privalov A.E., Bugaichenko P.Yu. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168196>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-24)
20. Tarasov A.G., Milyaev I.K., Musienko A.S. *Trudy MAI*, 2023, no. 131. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175923>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-17)

Статья поступила в редакцию 06.10.2023

Одобрена после рецензирования 12.10.2023

Принята к публикации 25.12.2023

The article was submitted on 06.10.2023; approved after reviewing on 12.10. 2023; accepted for publication on 25.12.2023