

Научная статья
УДК 621.396
DOI: [10.34759/trd-2023-131-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-17)

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Анатолий Геннадьевич Тарасов^{1✉}, Илья Константинович Миляев²,
Анатолий Сергеевич Мусиенко³

^{1,2,3}Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, Россия

¹vka@mil.ru✉

Аннотация. Рассматривается модель оценки коэффициента готовности электрической кабельной системы космического средства, позволяющая получить адекватную оценку коэффициента готовности с учетом особенностей определения технического состояния и сравнить эффективность применения различных способов коммутации при диагностировании электрической кабельной системы. Предлагаемая модель может быть использована специалистами при проведении операций контроля и диагностирования электрической кабельной системы с целью повышения их оперативности.

Ключевые слова: электрическая кабельная система, коэффициент готовности, количество коммутаций, процессы контроля и диагностирования

Для цитирования: 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. № 131. DOI: [10.34759/trd-2023-131-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-17)

Original article

A MODEL FOR ASSESSING THE AVAILABILITY FACTOR OF ELECTRICAL CABLE SYSTEMS OF SPACE VEHICLES, TAKING INTO ACCOUNT THE SPECIFICS OF DETERMINING THE TECHNICAL CONDITION

Anatoly G. Tarasov¹✉, Ilya K. Milyaev², Anatoly S. Musienko³

^{1,2,3}Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,
Saint Petersburg, Russia

¹yka@mil.ru✉

Abstract. The article describes the methods, which are based on the concepts and relationships of probability theory and graph theory, to assess the impact of the switching number in the process of a cable network diagnosing on the availability factor employing the frozen coefficients method. The subject relevancy is being confirmed by the fact that more than 60% of electrical equipment has exhausted its operational life, and, with a view to the dynamics of aging, a more thorough diagnosis of its condition is required.

The proposed methodology is based on the theory of probability and graph theory, as well as the basic concepts and relationships of the theory of reliability and technical diagnostics of systems. The initial data is information on technical condition of the power

grid equipment elements of space vehicles in the course of the test control, information on the reliability (structural and logical diagrams, failure rates of elements) of technological power grid equipment, as well as diagnostic models that link the types of technical conditions and diagnostic signs of electrical equipment.

When organizing of the electrical cable system control and restoring its performance, it is necessary to account for the number of switching electrical circuits, affecting significantly the electrical cable system readiness to perform tasks according to its direct purpose. In this regard, the obtained model for the availability factor assessing of the spacecraft electrical cable system allowed determining reduction in the duration of determining the technical condition of the electric cable system by 75%, and the availability factor increase of the spacecraft electric cable system by 1.7% through the adaptive switching application.

The proposed model may be employed by specialists when performing control and diagnostic works of a cable electrical system with a view to increase their efficiency.

The obtained model for the availability factor assessment of a spacecraft electrical cable system allows obtaining an adequate assessment of the availability factor with account for specifics of the technical condition determining, as well as comparing the efficiency various switching methods application for the electrical cable system diagnosing.

Thus, an important point for ensuring the operable state of electrical equipment is adoption of a reasonable decision on its operational technical condition in connection with the individual characteristics of each piece of electrical equipment. The obtained data allow drawing up more reasonable plans for priority measures for the repair and renewal of

electrical equipment based on the assessments of specialists working on the ground - experts, while improving the quality of management decisions.

Keywords: prior distribution, control trials, likelihood function, Bayesian estimate, posterior distribution, estimation accuracy, sampling control

For citation: Tarasov A.G., Milyaev I.K., Musienko A.S. A model for assessing the availability factor of electrical cable systems of space vehicles, taking into account the specifics of determining the technical condition. *Trudy MAI*, 2023, no. 131. DOI: [10.34759/trd-2023-131-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-17)

Введение

В результате сравнения различных схем марковского процесса, связывающих показатели надежности и диагностирования космических средств, определено, что наиболее предпочтительным является граф [1-4, 14], представленный на рисунке 1.

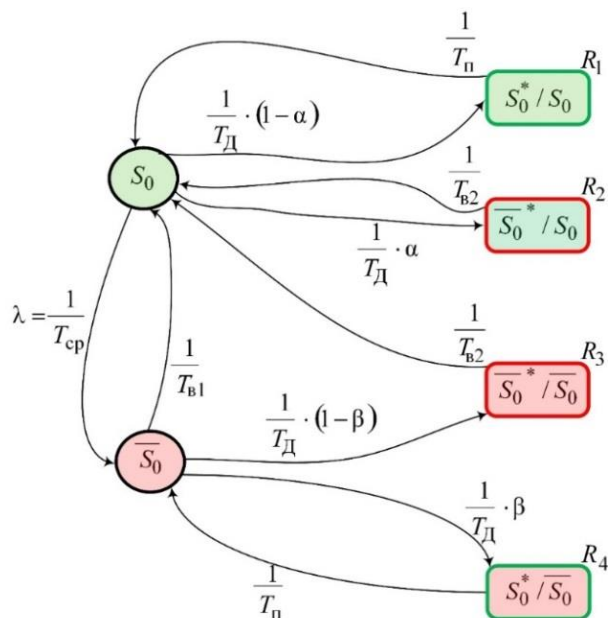


Рисунок 1 – Схема марковского процесса, связывающая показатели надежности и диагностирования

В качестве состояний моделируемого процесса выступают работоспособное и неработоспособное виды технического состояния космического средства (S_0, \bar{S}_0), в которых диагностирование не проводится (т.е. «рабочий режим»); а также состояния $R_1 - R_4$, при которых производится диагностирование, где: R_1, R_3 – состояния, при которых проводится диагностирование с достоверным результатом (S_0^*/S_0 – система диагностирования фиксирует работоспособное состояние S_0^* , при этом космическое средство действительно работоспособно $S_0, \bar{S}_0^*/\bar{S}_0$ – система диагностирования обнаруживает неработоспособное состояние \bar{S}_0^* , при этом космическое средство действительно неработоспособно \bar{S}_0); R_2, R_4 – состояния, при которых проводится диагностирование с ошибочным результатом (\bar{S}_0^*/S_0 – система диагностирования обнаруживает неработоспособное состояние \bar{S}_0^* , а при этом космическое средство работоспособно $S_0, S_0^*/\bar{S}_0$ – система диагностирования фиксирует работоспособное состояние S_0^* , а при этом космическое средство неработоспособно \bar{S}_0).

На рисунке 1 также введены следующие обозначения: α, β – вероятности ошибок диагностирования (ошибок 1-го и 2-го рода); $T_{\text{ср}}$ – средняя наработка на отказ; $T_{\text{д}}$ – периодичность диагностирования; $T_{\text{в1}}$ – среднее время восстановления без применения средств диагностирования, т.е. предполагается, что космическое средство можно восстановить даже при отсутствии или отказе средств диагностирования, например, с помощью последовательной замены на запасные блоки до тех пор, пока система не станет работоспособной, очевидно, что на это может потребоваться значительное время и ресурсы.

Одной из важных составляющих космического средства является его электрическая кабельная система (ЭКС), представляющая собой совокупность физических каналов для передачи электрических сигналов и электрической энергии, включающие электрические кабели с электрическими цепями внутри них, соединительные разъемы, коммутационные элементы и устройства, имеющие определенную схему соединений внутренних электрических цепей.

Опыт практической эксплуатации космических средств (КСр) [5-7] показал, для любой ЭКС космического средства возможно выделить третье состояние S_H – ЭКС в неизвестном состоянии (состояние диагностирования). В данном случае, основная особенность эксплуатации ЭКС заключается в том, что применение по назначению ЭКС занимает короткое время в общей продолжительности эксплуатации ЭКС. Основное время ЭКС «не эксплуатируется» в физическом смысле. Поэтому предлагается новая схема марковского процесса, связывающая показатели надежности и диагностирования ЭКС КСр (рисунок 2).

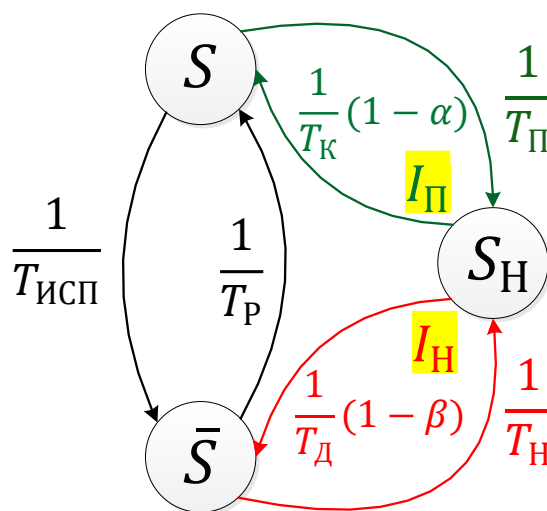


Рисунок 2 – Схема марковского процесса, связывающая показатели надежности и диагностирования ЭКС КСр

На рисунке 2 введены следующие обозначения: S – ЭКС исправна, \bar{S} – ЭКС неисправна, S_H – ЭКС в неизвестном состоянии (состояние диагностирования), $T_{\text{исп}}$ – длительность использования ЭКС по назначению, T_P – время восстановления без диагностики неисправности (время ремонта), T_{Π} – периодичность диагностирования, T_K – время контроля технического состояния при штатной подготовке, I_{Π} – количество периодов контроля технического состояния при штатной подготовке, α – вероятность ошибки первого рода, T_H – длительность устранения неисправности, T_D – время диагностирования при поиске неисправности, I_H – количество периодов поиска и устранения неисправности, β – вероятность ошибки второго рода.

Определение исправного состояния ЭКС происходит не постоянно, а с определенным периодом T_{Π} – периодичность диагностирования при штатной эксплуатации, если при предыдущем контроле (проведении ТО, регламента, доработок и т.п.) сделан вывод, что ЭКС исправна, то считается, что и на протяжении длительности T_{Π} ЭКС также является исправной. В течении T_{Π} ЭКС «не эксплуатируется» в физическом смысле. Когда наступает период контроля технического состояния, считается что ЭКС переходит в состояние S_H – ЭКС в неизвестном состоянии (состоянии диагностирования), то есть доверительное время T_{Π} уже закончилось, значит уже не считается, что ЭКС находится в исправном состоянии, но и не доказано, что ЭКС неисправна. Контроль технического состояния ЭКС проводится по ЭД за время T_K – время контроля технического состояния при штатной подготовке, делается вывод об исправности ЭКС и ЭКС переходит опять в состояние S . Такой контроль технического состояния за время эксплуатации

проходит не один раз, а I_{Π} – количество периодов контроля технического состояния при штатной подготовке.

Если при контроле выявляется неисправность ЭКС, то осуществляется переход в неисправное состояние \bar{S} , при этом время контроля технического состояния включается в общее время диагностирования неисправности $T_{\text{д}}$. Для поиска и устранения неисправности необходимо время $T_{\text{н}}$ – длительность устранения неисправности. Диагностирование ЭКС при поиске и устранении неисправности ($T_{\text{д}}$ и $T_{\text{н}}$) выполняется не только по ЭД, но и по техническим решениям и заданиям. Контроль исправности ЭКС $T_{\text{к}}$ проводится согласно ЭД и в результате подтверждается исправное состояние S , затраченное на проведение контроля время учитывается во времени диагностирования $T_{\text{д}}$, или контроль не проводится и ЭКС переходит в неизвестное состояние $S_{\text{н}}$. Таким образом операции могут повторяться несколько раз, обозначим $I_{\text{н}}$ – количество циклов поиска и устранения неисправности.

ЭКС может выйти из строя в процессе ее применения по назначению $T_{\text{исп}}$ – длительность использования ЭКС по назначению, тогда поиск и устранение неисправности должен начаться сразу после перехода из состояния S в \bar{S} . При этом, восстанавливать ЭКС возможно без поиска неисправности и диагностирования (например, просто заменой из ЗИП) $T_{\text{р}}$ – время восстановления без диагностики (время ремонта), либо опять через $T_{\text{н}}$ и $T_{\text{к}}$ (поиск и устранение неисправности с использованием контроля исправности).

Решение системы уравнений, построенных на основе схемы рис. 2 позволило получить следующие выражения для определения средней наработки до отказа $T_{\text{СР}}$, времени восстановления работоспособного состояния ЭКС $T_{\text{В}}$, и коэффициента готовности ЭКС космического средства $k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}}$:

$$T_{\text{СР}} = T_{\text{ИСП}} + I_{\text{П}} \cdot T_{\text{П}} + I_{\text{П}} \cdot T_{\text{К}} \cdot (1 - \alpha) + I_{\text{Н}} \cdot (T_{\text{Н}} + T_{\text{К}}) \cdot \beta \quad (1)$$

$$T_{\text{В}} = T_{\text{Р}} + I_{\text{Н}} \cdot T_{\text{Н}} + I_{\text{Н}} \cdot T_{\text{Д}} \cdot (1 - \beta) + I_{\text{П}} \cdot (T_{\text{П}} + T_{\text{Д}}) \cdot \alpha + I_{\text{П}} \cdot T_{\text{К}} \cdot \alpha \quad (2)$$

$$k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}} = \frac{T_{\text{СР}}}{T_{\text{СР}} + T_{\text{В}}} = \frac{T_{\text{ИСП}} + I_{\text{П}} \cdot T_{\text{П}} + I_{\text{П}} \cdot T_{\text{К}} \cdot (1 - \alpha) + I_{\text{Н}} \cdot (T_{\text{Н}} + T_{\text{К}}) \cdot \beta}{T_{\text{ИСП}} + I_{\text{П}} \cdot T_{\text{П}} + I_{\text{П}} \cdot T_{\text{К}} \cdot (1 - \alpha) + I_{\text{Н}} \cdot (T_{\text{Н}} + T_{\text{К}}) \cdot \beta + T_{\text{Р}} + I_{\text{Н}} \cdot T_{\text{Н}} + I_{\text{Н}} \cdot T_{\text{Д}} \cdot (1 - \beta) + I_{\text{П}} \cdot (T_{\text{П}} + T_{\text{Д}}) \cdot \alpha + I_{\text{П}} \cdot T_{\text{К}} \cdot \alpha} \quad (3)$$

В общем случае, коэффициент готовности K_{Γ} космического средства симпликативно зависит от всех w (количество элементов космического средства) коэффициентов готовности K_{Γ}^i отдельных элементов, входящих в состав космического средства [8-10]:

$$K_{\Gamma} = \prod_{i=1}^w K_{\Gamma}^i \quad (4)$$

В свою очередь, коэффициент готовности $K_{\Gamma}^{\text{ЭКС}}$ всей электрической кабельной системы космического средства так же симпликативно зависит от всех $w^{\text{ЭКС}}$ (количество ЭКС, входящих в состав космического средства) коэффициентов готовности $k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j}$ отдельных электрических кабельных систем:

$$K_{\Gamma}^{\text{ЭКС}} = \prod_{j=1}^{w^{\text{ЭКС}}} k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j} \quad (5)$$

Соответственно формула (28) для расчета коэффициента готовности $k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j}$ электрических кабельных систем $\mathcal{N}j$ будет представлять собой:

$$k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j} = \frac{T_{\text{СР}j}}{T_{\text{СР}j} + T_{\text{В}j}} \quad (6)$$

Параметры $T_{\text{СР}j}$ и $T_{\text{В}j}$ рассчитываются для ЭКС $\mathcal{N}j$ по формулам (1) и (2).

Определение продолжительности диагностирования электрической кабельной системы

Контроль технического состояния ЭКС космического средства проводится при различных этапах работы [11-13, 15]:

– при штатной работе космического средства: запланированный контроль технического состояния ЭКС или выполнение операций технологического графика (ТГ);

– при нештатной работе космического средства – при поиске и устранении неисправности.

При уменьшении длительности контроля (диагностирования) ЭКС космического средства (увеличение оперативности определения технического состояния ЭКС) увеличивается коэффициент готовности K_r космического средства. И наоборот, увеличение длительности контроля (диагностирования) ЭКС космического средства (снижение оперативности определения технического состояния ЭКС) как при штатной подготовке, так и при возникновении неисправностей, может привести к превышению времени, заданного циклограммой или ТГ, то есть к снижению коэффициента готовности K_r космического средства и даже к невыполнению целевой задачи космическим средством, например по своевременному выведению орбитального средства.

Применительно к ЭКС космических средств продолжительность определения технического состояния ЭКС зависит от следующих параметров [16, 17]:

– $t_{\text{ПР}}$ – время проведения одного замера активного электрического сопротивления средством технического диагностирования;

– $t_{\text{КТ}}$ – время коммутации одной цепи (группы цепей) средством технического диагностирования;

– $V^{\text{К}}$ – количество коммутаций (переключений) электрических цепей при проведении контроля ЭКС в штатном режиме;

– $V^{\text{Д}}$ – количество коммутаций (переключений) электрических цепей при проведении диагностирования ЭКС во время поиска и устранения неисправности.

Допуская, что $t_{\text{ПР}} = \text{const}$ и $t_{\text{КТ}} = \text{const}$ (для проверки технического состояния всех ЭКС одного космического средства используются одинаковые средства технического диагностирования, имеющие характеристики):

$$T_{\text{К}} = V^{\text{К}} \cdot (t_{\text{ПР}} + t_{\text{КТ}}), \quad (7)$$

$$T_{\text{Д}} = V^{\text{Д}} \cdot (t_{\text{ПР}} + t_{\text{КТ}}), \quad (8)$$

где $t_{\text{кон}}$ – время контроля ЭКС, заданное циклограммой или ТГ, поэтому $T_{\text{К}}$ не должно быть больше $t_{\text{кон}}$. Также необходимо обеспечить, чтобы $T_{\text{Д}}$ было минимально возможным.

Соответственно, возможно определить, что:

$$T_{\text{К}} = f(V^{\text{К}}, t_{\text{ПР}}, t_{\text{КТ}}) \leq t_{\text{кон}}, \quad (9)$$

$$T_{\text{Д}} = f(V^{\text{Д}}, t_{\text{ПР}}, t_{\text{КТ}}) \rightarrow 0 \quad (10)$$

Параметры $V^{\text{К}}$ и $V^{\text{Д}}$ зависят от $\widetilde{Q}^{\text{К}}$ и $\widetilde{Q}^{\text{Д}}$ – последовательностей коммутации электрических цепей при контроле и диагностировании ЭКС. Соответственно зависимости (9) и (10) в полном виде должны выглядеть как:

$$T_K = f[V^K(\widetilde{Q}^K), t_{\text{ПР}}, t_{\text{КТ}}], \widetilde{Q}^K \in Q_{\text{all}}, \quad (11)$$

$$T_D = f[V^D(\widetilde{Q}^D), t_{\text{ПР}}, t_{\text{КТ}}], \widetilde{Q}^D \in Q_{\text{all}} \quad (12)$$

Q_{all} – множество возможных вариантов последовательностей коммутации электрических цепей при контроле или диагностировании ЭКС.

Определение зависимости коэффициента готовности электрической кабельной системы от количества коммутаций при её диагностировании

Процессы контроля и диагностирования ЭКС зависят от множества показателей, одним из таких является – количество коммутаций при определении технического состояния ЭКС. Для оценки влияния V^K и V^D на $k_r^{\text{ЭКС}}$ и учитывая то, что некоторые из показателей как самой ЭКС так и процесса её эксплуатации бывает невозможно определить исходя из статистики проведенных работ или с помощью анализа эксплуатационной документации, воспользуемся методом замороженных коэффициентов [18]. Предположим, что существует некоторая ЭКС, определении технического состояния которой в процессе штатной подготовки и при поиске и устранении неисправности может проводиться несколькими способами. Необходимо оценить влияния изменений V^K и V^D на $k_r^{\text{ЭКС}}$, то есть найти такие способы определения технического состояния (при которых получаются свои количества коммутаций V^K и V^D), при которых при штатной подготовке и при поиске и устранении неисправности $k_r^{\text{ЭКС}}$ будет максимальным.

Исходя из проведенных экспериментальных исследований ЭКС определено, что изменения V^K и V^D влияют только на параметры T_K и T_D (соответственно зависимостей, а параметры $T_{\text{ИСП}}$, T_P , $T_{\text{П}}$, $T_{\text{Н}}$, α и β , а также $I_{\text{П}}$ и $I_{\text{Н}}$ не зависят от

количества коммутаций. То есть, какой бы ни был выбран способ определения технического состояния при штатной подготовке и при поиске и устранении неисправности при оценке влияния количества коммутаций на коэффициент готовности ЭКС параметры являются неизменными: $T_{\text{ИСП}} = \text{const}$, $T_{\text{P}} = \text{const}$, $T_{\text{П}} = \text{const}$, $T_{\text{H}} = \text{const}$, $\alpha = \text{const}$, $\beta = \text{const}$, $I_{\text{П}} = \text{const}$ и $I_{\text{H}} = \text{const}$.

Таким образом, используя зависимости (7–12) выделим неизменные (постоянные) составляющие и коэффициенты при параметрах V^{K} и $V^{\text{Д}}$:

$$k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}} = \frac{K_1 \cdot V^{\text{K}} + K_2}{K_3 V^{\text{K}} + K_4 \cdot V^{\text{Д}} + K_5}$$

$$K_1 = I_{\text{П}} \cdot (t_{\text{ПР}} + t_{\text{КТ}}) \cdot (1 - \alpha) + I_{\text{H}} \cdot (t_{\text{ПР}} + t_{\text{КТ}}) \cdot \beta$$

$$K_2 = T_{\text{ИСП}} + I_{\text{П}} \cdot T_{\text{П}} + I_{\text{H}} \cdot T_{\text{H}} \cdot \beta$$

$$K_3 = I_{\text{П}} \cdot (t_{\text{ПР}} + t_{\text{КТ}}) + I_{\text{H}} \cdot (t_{\text{ПР}} + t_{\text{КТ}}) \cdot \beta \quad (13)$$

$$K_4 = I_{\text{H}} \cdot (t_{\text{ПР}} + t_{\text{КТ}}) \cdot (1 - \beta) + I_{\text{П}} \cdot (t_{\text{ПР}} + t_{\text{КТ}}) \cdot \alpha$$

$$K_5 = T_{\text{ИСП}} + T_{\text{P}} + I_{\text{П}} \cdot T_{\text{П}} \cdot (1 + \alpha) + I_{\text{H}} \cdot T_{\text{H}} \cdot (1 + \beta)$$

$$K_1 = \text{const}, K_2 = \text{const},$$

$$K_3 = \text{const}, K_4 = \text{const},$$

$$K_5 = \text{const}.$$

Таким образом, модель оценки коэффициента готовности отдельной ЭКС космического средства, учитывающая особенности определения технического состояния с различным количеством коммутаций при диагностировании ЭКС, представляет собой зависимость (13).

Для сравнения коэффициентов готовности при эксплуатации ЭКС №j при выполнении коммутаций электрических цепей с разными последовательностями коммутаций (при контроле – $\widetilde{Q}_1^{\text{K}}$ и $\widetilde{Q}_2^{\text{K}}$, и при диагностировании – $\widetilde{Q}_1^{\text{Д}}$ и $\widetilde{Q}_2^{\text{Д}}$), необходимо оценить разность коэффициентов готовности этой ЭКС, рассчитанных для соответствующих последовательностей коммутации с соответствующими параметрами V_1^{K} и V_2^{K} , $V_1^{\text{Д}}$ и $V_2^{\text{Д}}$:

$$\Delta k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j} = k_{\Gamma 1}^{\text{ЭКС}j} - k_{\Gamma 2}^{\text{ЭКС}j} = \frac{K_1^j \cdot V_1^K + K_2^j}{K_3^j \cdot V_1^K + K_4^j \cdot V_1^D + K_5^j} - \frac{K_1^j \cdot V_2^K + K_2^j}{K_3^j \cdot V_2^K + K_4^j \cdot V_2^D + K_5^j} \quad (14)$$

Однако, учитывая то, что некоторые показатели ЭКС [19,20] M_{ij} и процесса её эксплуатации могут быть не определены, необходимо абстрагироваться от коэффициентов $K_1^j, K_2^j, K_3^j, K_4^j$ и K_5^j . Если бы оценка коэффициентов готовности ЭКС проводилась только с помощью сравнения полученных результатов количества коммутаций V_1 и V_2 при выполнении коммутаций электрических цепей с разными последовательностями \widetilde{Q}_1 и \widetilde{Q}_2 , то изменение $k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}}$ было бы обратно пропорционально изменению V . Так как для сравнения коэффициентов готовности при контроле и диагностировании ЭКС выполняются разные последовательности (при контроле – \widetilde{Q}_1^K и \widetilde{Q}_2^K , и при диагностировании – \widetilde{Q}_1^D и \widetilde{Q}_2^D), то необходимо оценивать взаимное влияние различных последовательностей коммутации, полученных при m различных способах коммутации, с соответствующими параметрами $V_1^K, V_2^K, V_3^K \dots V_m^K$ и $V_1^D, V_2^D, V_3^D \dots V_m^D$. При этом, разности $\Delta k_{\Gamma 12}^{\text{ЭКС}j} = k_{\Gamma 1}^{\text{ЭКС}j} - k_{\Gamma 2}^{\text{ЭКС}j}$, $\Delta k_{\Gamma 13}^{\text{ЭКС}j} = k_{\Gamma 1}^{\text{ЭКС}j} - k_{\Gamma 3}^{\text{ЭКС}j}$ и т. п. невозможно будет рассчитать из-за отсутствия некоторых из показателей как самой ЭКС так и процесса её эксплуатации. Поэтому используя формулу (14), теорию пределов и проведя мультиплексирование, получена зависимость:

$$Dk_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j} = \frac{(V_2^D - V_1^D)^3}{V_2^D \cdot (V_1^D + V_2^D)^2} + \frac{(V_2^K - V_1^K)^3}{V_2^K \cdot (V_1^K + V_2^K)^2} \quad (15)$$

С помощью зависимости (15) возможно количественно оценить разность коэффициентов готовности ЭКС M_{ij} при использовании разных последовательностей

контроля и диагностирования, при отсутствии возможности определить или рассчитать параметры ЭКС для формул (13) и (14).

Для сравнения качества оценки разности коэффициентов готовности при последовательностях \widetilde{Q}_1^K и \widetilde{Q}_2^K , \widetilde{Q}_1^D и \widetilde{Q}_2^D возьмем ЭКС с различными значениями $T_{\text{ИСП}1} \neq T_{\text{ИСП}2}$, $T_{\text{Р}1} \neq T_{\text{Р}2}$, $T_{\text{П}1} \neq T_{\text{П}2}$ и $T_{\text{Н}1} \neq T_{\text{Н}2}$, которые описывают разную стратегию эксплуатации ЭКС. А значения $\alpha_1 = \alpha_2 = \text{const}$, $\beta_1 = \beta_2 = \text{const}$, $I_{\text{П}1} = I_{\text{П}2} = \text{const}$ и $I_{\text{Н}1} = I_{\text{Н}2} = \text{const}$ описывают одинаковые характеристики жизненного цикла ЭКС. Для контроля и диагностирования ЭКС во время эксплуатации используется одно и то же средство технического диагностирования поэтому $t_{\text{ПР}1} = t_{\text{ПР}2} = \text{const}$ и $t_{\text{КТ}1} = t_{\text{КТ}2} = \text{const}$. Как видно из формулы (47) параметры $T_{\text{ИСП}}$, $T_{\text{Р}1}$, $T_{\text{П}}$ и $T_{\text{Н}}$ влияют только на коэффициенты K_2 , K_5 и при изменении параметров $T_{\text{ИСП}}$, $T_{\text{Р}1}$, $T_{\text{П}}$ и $T_{\text{Н}}$ коэффициенты K_1 , K_3 и K_4 остаются неизменными. Так как последовательности \widetilde{Q}_1^K и \widetilde{Q}_2^K , \widetilde{Q}_1^D и \widetilde{Q}_2^D по сути своей являются частью стратегии эксплуатации, то для сравнения влияния изменения V^K и V^D на коэффициент готовности примем $K_1^1 = K_1^2 = 50$, $K_3^1 = K_3^2 = 40$ и $K_4^1 = K_4^2 = 6$. Для разных стратегий эксплуатации одной и той же ЭКС $K_2^1 \neq K_2^2$ и $K_5^1 \neq K_5^2$:

Исходные данные стратегии №1:

$$K_2^1 = 1000 \text{ и } K_5^1 = 300.$$

Исходные данные стратегии №2:

$$K_2^2 = 2000 \text{ и } K_5^2 = 500.$$

При этом изменение коэффициента готовности различных стратегий ЭКС будем сравнивать с ЭКС при значении $V^K = 500$ и $V^D = 650$. Для упрощения, изменения V^K и V^D будем проводить одновременно, при этом $V_1^D = 1.3 * V_1^K$ и $V_2^D = 1.3 * V_2^K$. Коэффициент 1.3 выбран исходя из статистики, так как в среднем количество необходимых коммутаций для поиска неисправности в 1.3 раза больше чем при контроле ЭКС. Проведем сравнение оценки влияния V^K и V^D на изменение $k_{\Gamma}^{\text{ЭКС1}}$ и $k_{\Gamma}^{\text{ЭКС2}}$ с использованием зависимостей (14) и (15).

На рисунке 3 показаны графики зависимостей: $\Delta k_{\Gamma}^{\text{ЭКС1}} = f(V^K, V^D)$ – синий и $\Delta k_{\Gamma}^{\text{ЭКС2}} = f(V^K, V^D)$ – красный, рассчитанные по формуле (48), а $Dk_{\Gamma}^{\text{ЭКС}} = f(V^K, V^D)$ – зеленый, рассчитанный по формуле (49). Так как в зависимости (49) не используются коэффициенты K_1, K_2, K_3, K_4 и K_5 , то график $Dk_{\Gamma}^{\text{ЭКС}} = f(V^K, V^D)$ один для двух стратегий эксплуатации ЭКС.

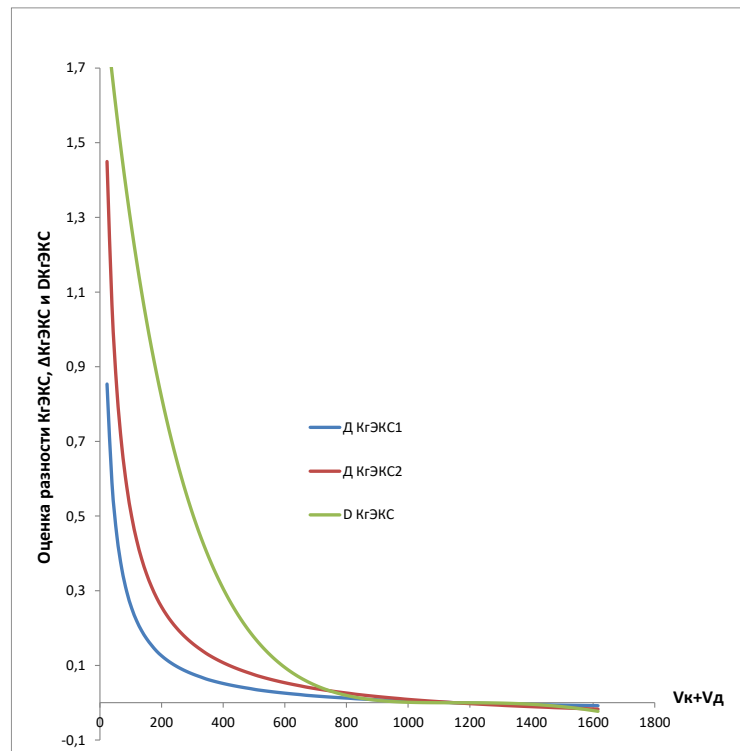


Рисунок 3 – Сравнение качества оценки разности

коэффициентов готовности при контроле и диагностировании ЭКС

Как видно из рисунка 3 синий график $Dk_{\Gamma}^{\text{ЭКС}} = f(V^K, V^D)$ подобен красному $\Delta k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}1} = f(V^K, V^D)$ и зеленому $\Delta k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}2} = f(V^K, V^D)$. Все три графика пересекают ось абсцисс в одной точке. Различные коэффициенты K_2 и K_5 только изменяют площадь под графиком, но не влияют на качественную оценку изменения $k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}}$ в зависимости от V^K и V^D .

Проведенные теоретические сравнения различных способов оценки коэффициентов готовности ЭКС $\Delta k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j}$ и $Dk_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j}$, позволили сделать вывод о возможности использования зависимости (15) для оценки разности коэффициентов готовности ЭКС, как влияние V^K и V^D на $k_{\Gamma}^{\text{ЭКС}}$. Соответственно:

- $Dk_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j} > 0$ – последовательность $\bar{Q}_1(\bar{Q}_1^K, \bar{Q}_1^D)$ лучше $\bar{Q}_2(\bar{Q}_2^K, \bar{Q}_2^D)$;
- $Dk_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j} < 0$ – последовательность $\bar{Q}_2(\bar{Q}_2^K, \bar{Q}_2^D)$ лучше $\bar{Q}_1(\bar{Q}_1^K, \bar{Q}_1^D)$;
- $Dk_{\Gamma}^{\text{ЭКС}j} = 0$ – при последовательностях $\bar{Q}_1(\bar{Q}_1^K, \bar{Q}_1^D)$ и $\bar{Q}_2(\bar{Q}_2^K, \bar{Q}_2^D)$

коэффициент готовности ЭКС неизменен.

Сравнение влияния количества коммутаций при диагностировании на коэффициент готовности электрической кабельной системы

Приведем пример одной из ЭКС космического средства. Для упрощения примем, что в составе космического средства присутствует 10 одинаковых по параметрам ЭКС со следующими исходными данными:

- $T_{\text{исп}} = 300 \text{ час} = 1080000 \text{ сек} = \text{const}$ – длительность использования ЭКС по назначению;
- $T_{\text{р}} = 6 \text{ час} = 21600 \text{ сек} = \text{const}$ – время восстановления без диагностики неисправности (время ремонта);
- $T_{\text{п}} = 30 \text{ дн} = 2592000 \text{ сек} = \text{const}$ – периодичность диагностирования;
- $T_{\text{н}} = 2 \text{ час} = 7200 \text{ сек} = \text{const}$ – длительность устранения неисправности;
- $I_{\text{п}} = 115 = \text{const}$ – количество периодов контроля технического состояния при штатной подготовке, что примерно соответствует 10 годам эксплуатации ($I_{\text{п}} * T_{\text{п}} = 3300 \text{ дн} + \text{работы} \approx 10 \text{ лет}$);
- $\alpha = 0.02 = \text{const}$ – вероятность ошибки 1-рода;
- $I_{\text{н}} = 25 = \text{const}$ – количество периодов поиска и устранения неисправности;
- $\beta = 0.01 = \text{const}$ – вероятность ошибки 2-рода;
- $t_{\text{пп}} = 3 \text{ сек} = \text{const}$ – время проведения одного замера активного электрического сопротивления средством технического диагностирования;
- $t_{\text{кт}} = 1 \text{ сек} = \text{const}$ – время коммутации одной цепи (группы цепей) средством технического диагностирования.

В составе ЭКС $n = 70$ разобщенных цепей, в ЭКС отсутствуют сообщенные и связанные цепи. Для проверки всех возможных комбинаций разобщенных цепей при односторонних измерениях во время выполнения контроля ЭКС в соответствии с ТГ необходимо $V^{\text{К}} = n \cdot (n - 1) = 4830$ коммутаций, для диагностирования ЭКС, в среднем необходимо $V^{\text{Д}} = 1.3 * V^{\text{К}} = 6279$.

Таким образом, исходя из зависимости (13): $K_1 = 451.8$, $K_2 = 299161800$, $K_3 = 461$, $K_4 = 108.2$ и $K_5 = 305325000$, а $k_r^{\text{ЭКС}j} = 0.977656292$.

Исходя из зависимости (5):

$$K_r^{\text{ЭКС}} = \prod_{j=1}^{10} k_r^{\text{ЭКС}j} = (k_r^{\text{ЭКС}})^{10} = 0,797741154. \quad (16)$$

На практике сократить количество коммутаций до 0 невозможно, но если сократить количество коммутаций при проведении диагностирования (V^K и V^A) до 15%, это позволит сократить продолжительность определения технического состояния ЭКС сократится на 75% и увеличить коэффициент готовности ЭКС космического средства на 1,7%.

Заключение

Получена аналитическая зависимость оценивания коэффициента готовности космического средства по заданным параметрам системы диагностирования, позволяющая сформулировать порядок оценки изменения коэффициента готовности электрической кабельной системы космического средства как комплексного показателя надежности.

Рассмотрен вариант оценки изменения коэффициента готовности электрической кабельной системы космического средства при помощи вариации количества коммутаций электрических цепей при определении технического состояния электрической кабельной системы.

Сделан вывод о возможности использования полученной модели оценки коэффициента готовности электрических кабельных систем космических средств,

учитывающей особенность определения технического состояния, для оценки влияния количества коммутаций электрических цепей на коэффициент готовности электрических кабельных систем космических средств.

Список источников

1. 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.
2. Дорожко И.В., Копейка А.Л. Исследование коэффициента готовности сложных технических комплексов с помощью имитационной модели, разработанной в среде Stateflow // Интеллектуальные технологии на транспорте (Intellectual Technologies on Transport). 2018. № 3. С. 18–26.
3. Дорожко И.В., Копейка А.Л., Захарова Е.А. Модель диагностирования сложного технического комплекса с учетом охвата показателей надежности на основе байесовских сетей доверия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 335-342.
4. 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 им. А.Ф. Можайского. 2019. № 671. С. 303–313.
5. 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. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=168195>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-23)

6. Зайцев Д.О., Павлов Д.А., Нестечук Е.А. Методика контроля технического состояния бортовых систем ракет-носителей на основе обработки быстроменяющихся параметров // Труды МАИ. 2021. № 121. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=162665>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-18)

7. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Умаров А.Б. Метод оценивания показателей живучести бортовых систем малых космических аппаратов в условиях изменяющихся режимов функционирования и деструктивных воздействий // учет метрологического обеспечения // Труды МАИ. 2021. № 120. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=161425>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-11)

8. 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)

9. 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>

10. Кобзарев И.М., Копкин Е.В. Оптимальный алгоритм анализа технического состояния объекта на основе меры ценности диагностической информации // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2018. № 661. С. 15–31.
11. Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Лазутин О.Г. Выбор дискретных диагностических признаков с учетом их ценности для распознавания технического состояния объекта // Информация и космос. 2015. № 2. С. 111-117.
12. 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.
13. IEC 61070. Compliance test procedures for steady-state availability, IEC, 1991, 52 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/4413>
14. IEC 61165. Application of Markov techniques, BSI, 2008, 40 p. URL: <https://knowledge.bsigroup.com/products/application-of-markov-techniques/standard>
15. Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. С. 29-43.
16. Shubinsky Igor B., Zamyshlyayev Alexey M. Topological semimarkov method for calculation of stationary parameters of reliability and functional safety of technical systems // Theory & Applications, 2012, no. 2, pp. 12-22.
17. Деменков Н.П., Микрин Е.А. Управление в технических системах. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 232-254.

18. Левин В.М. Статистический метод распознавания дефектов в силовых трансформаторах при их техническом обслуживании по состоянию // Промышленная энергетика. 2013. № 8. С. 37–42.
19. Хальясмаа А.И., Дмитриев С.А., Кокин С.Е., Осотова М.В. Оценка состояния силовых трансформаторов на основе анализа данных технической диагностики // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2013. Т. 13. № 2. С. 114-120.
20. Соколов В.В., Маяков В.П., Осервассер М.Я., Бережной В.Н. Методы испытания и диагностики трансформаторного оборудования в эксплуатации. – Новосибирск: Сибприн, 2015. С. 122–134.

References

1. 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.
2. Dorozhko I.V., Kopeika A.L. *Intellektual'nye tekhnologii na transporte* (Intellectual Technologies on Transport), 2018, no. 3, pp. 18–26.
3. Dorozhko I.V., Kopeika A.L., Zakharova E.A. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 12, pp. 335-342.
4. Dorozhko I.V., Kopeika A.L., Osipov N.A. *Trudy Voенно-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2019, no. 671, pp. 303–313.
5. Dorozhko I.V., Gorokhov G.M., Kirillov I.A. *Trudy MAI*, 2022, 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)

6. Zaitsev D.O., Pavlov D.A., Nestechuk E.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162665>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-18)
7. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Umarov A.B. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161425>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-11)
8. 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)
9. 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>
10. Kobzarev I.M., Kopkin E.V. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2018, no. 661, pp. 15–31.
11. Kopkin E.V., Kravtsov A.N., Lazutin O.G. *Informatsiya i kosmos*, 2015, no. 2, pp. 111-117.
12. Kopkin E.V., Chikurov V.A., Aleinik V.V., Lazutin O.G. *Trudy SPIIRAN*, 2015, no. 4 (41), pp. 106–130.
13. *IEC 61070. Compliance test procedures for steady-state availability*, IEC, 1991, 52 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/4413>
14. *IEC 61165. Application of Markov techniques*, BSI, 2008, 40 p. URL: <https://knowledge.bsigroup.com/products/application-of-markov-techniques/standard>
15. Mikrin E.A. *Bortovye komplekсы upravlenija kosmicheskikh apparatov* (Onboard spacecraft control systems), MGTU im. N.Je. Baumana, 2014, pp. 29-43.

16. Shubinsky Igor B., Zamyshlyayev Alexey M. Topological semimarkov method for calculation of stationary parameters of reliability and functional safety of technical systems, *Theory & Applications*, 2012, no. 2, pp. 12-22.
17. Demenkov N.P., Mikrin E.A., *Upravlenie v tehnikeskikh sistemah* (Control in technical systems), MGTU im. N.Ie. Baumana, 2017, pp. 232–254.
18. Levin V.M. *Promyshlennaya energetika*, 2013, no. 8, pp. 37–42.
19. Khal'yasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E., Osotova M.V. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 114-120.
20. Sokolov V.V., Mayakov V.P., Oservasser M.Ya., Berezhnoi V.N. *Metody ispytaniya i diagnostiki transformatornogo oborudovaniya v ekspluatatsii* (Methods for diagnosing the state of transformer equipment), Novosibirsk, Sibprin, 2015, pp. 122–134.

Статья поступила в редакцию 23.05.2023

Одобрена после рецензирования 01.06.2023

Принята к публикации 28.08.2023

The article was submitted on 23.05.2023; approved after reviewing on 01.06.2023; accepted for publication on 28.08.2023