

Моделирование восстанавливаемых радиоэлектронных систем с резервированием

Т.Э. Гельфман, А.П. Пирхавка, В.О. Скрипачев, М.С. Цаплин

Аннотация. В статье приведен подход к моделированию восстанавливаемых радиоэлектронных систем (РЭС) с резервированием. Одним из критериев надежности РЭС является их восстанавливаемость. Влияние восстанавливаемости зависит от законов распределения отказов и восстановлений элементов РЭС. Рассмотрены особенности применения метода хорд при решении задачи определения времени восстановления РЭС, учитывая различные сценарии резервирования. Показано время восстановления системы после отказов является критическим показателем в области надежности, поскольку от него зависит готовность системы к выполнению своих функций в нормальных и критических ситуациях. Показан расчет коэффициента готовности системы, который равен произведению коэффициентов готовности трех последовательно соединенных участков, составляющих модель РЭС. Для расчета коэффициента готовности реализовано программное обеспечение на языке JavaScript. Отмечены особенности его работы. В качестве примера приведен расчет зависимости коэффициента готовности от времени восстановления земной станции спутниковой связи. Подход, предложенный в статье, может быть использован для оптимизации структуры РЭС, совершенствования методов резервирования, а также минимизацию времени восстановления при критических отказах.

Ключевые слова: моделирование, спутниковая система связи, радиоэлектронная система, надежность, метод Монте Карло, время восстановления, ремонтпригодность, резервирование, интенсивность отказов, коэффициент готовности, метод хорд, программное обеспечение.

Статья получена 24 августа 2024.

Т.Э. Гельфман, доцент кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия (e-mail: gelfman@mirea.ru)

А.П. Пирхавка, к.т.н., доцент кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия (e-mail: pirkhavka@mirea.ru)

В.О. Скрипачев, к.т.н., старший научный сотрудник ФГБНУ «Аналитический центр», доцент кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия (e-mail: skripatchevv@inbox.ru)

М.С. Цаплин, студент Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия (e-mail: tsaplin2003@mail.ru)

I. ВВЕДЕНИЕ

Восстанавливаемость системы означает возможность возвращения к функционированию путем ремонта или замены компонентов, не требуя полной замены системы. Обеспечение восстанавливаемости особенно важно в радиоэлектронных системах (РЭС), где стоимость и сложность оборудования делают его полную замену непрактичной или слишком дорогостоящей.

В теории надежности РЭС знание времени восстановления после отказа элемента или блока системы имеет важное практическое значение по следующим причинам:

1. Оценка надежности системы. Время восстановления после отказа является важным показателем надежности системы. Чем меньше это время, тем быстрее система может вернуться к нормальной работе после отказа, что способствует увеличению надежности всей системы.

2. Планирование обслуживания и замены. Знание времени восстановления позволяет эффективно планировать работы по обслуживанию и замене отказавших элементов или блоков. Если время восстановления короткое, то можно ожидать, что система быстро вернется к работе после замены или восстановления отказавших компонентов.

3. Прогнозирование доступности системы. Для систем, где важна непрерывная доступность, знание времени восстановления помогает прогнозировать доступность системы для выполнения своих функций в течение определенного времени, что повышает коэффициент оперативной готовности РЭС.

4. Планирование реакции на отказ. Знание времени восстановления позволяет разработать стратегии реагирования на отказы. Например, если время восстановления короткое, можно использовать автоматические системы управления для быстрого переключения на резервные элементы или блоки.

5. Оценка общей производительности системы. Время восстановления влияет на общую производительность системы. Чем меньше это время, тем быстрее система сможет продолжить выполнение своих функций после отказа, что снижает негативное влияние отказа на работу системы.

Целью данной статьи является определение времени восстановления резервированной РЭС с использованием разработанного программного обеспечения.

II. ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ПОДХОД ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Восстановление является важнейшим средством, влияющим на улучшение показателей надежности РЭС. Однако это влияние существенным образом зависит от законов распределения отказов и восстановлений элементов. Рассмотрим восстанавливаемые РЭС при экспоненциальных распределениях отказов и восстановлений.

Для повышения надежности восстанавливаемых РЭС имеются два принципиально разных способа: повышение надежности путем увеличения средней наработки до отказа либо повышение ремонтпригодности РЭС снижением времени восстановления. Повышение ремонтпригодности без резервирования – большая техническая проблема [1], требующая дополнительное оборудование, которое должно передаваться заказчику. Поэтому задача анализа и сравнения различных восстанавливаемых систем с резервированием по времени восстановления для обеспечения заданного коэффициента готовности при разных интенсивностях отказов элементов является актуальной. В работе систем могут быть перерывы, вызванные отказами устройств и устраняемые путем восстановления аппаратуры.

В настоящей работе используется метод хорд, который позволяет эффективно решать задачу определения времени восстановления, учитывая различные сценарии резервирования.

Метод хорд – это численный метод нахождения корней уравнений, применяемый для решения нелинейных уравнений вида $f(x) = 0$. Он является одним из наиболее распространенных методов приближения корней и широко используется на практике из-за своей относительной простоты и эффективности.

В основе метода хорд лежит принцип замены нелинейной функции $f(x)$, график которой имеет корень в некотором интервале $[a, b]$, на отрезок прямой – хорду, которая пересекает ось абсцисс в точке, приближенной к истинному корню. Этот метод близок к методу секущих и методу Ньютона, но в отличие от последнего не требует вычисления производной функции, что делает его более удобным в некоторых случаях.

Метод хорд может быть использован для определения времени восстановления системы после отказов. Это время является критическим показателем в области надежности, поскольку от него зависит готовность системы к выполнению своих функций в нормальных и критических ситуациях.

Рассмотрим на примере иллюстрации метод хорд (рисунок 1). Применение метода хорд начинается с определения точек (a, b, c) на функции времени восстановления системы, которая обычно имеет нелинейный характер.

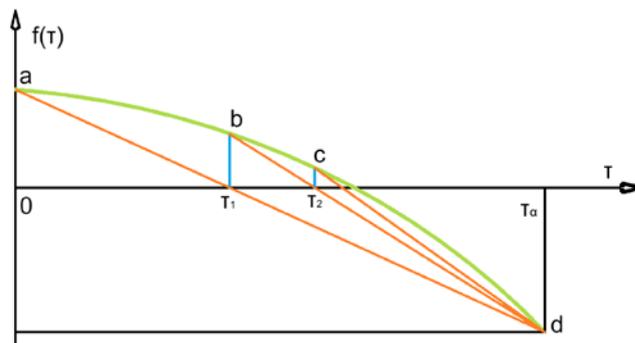


Рисунок 1 – Иллюстрация применения метода хорд

Затем с использованием этих точек, строится серия отрезков – хорд $(a - d, b - d, c - d)$, которые аппроксимируют функцию времени восстановления. Это позволяет выполнить более простые вычисления и быстро оценить вероятность безотказной работы системы на интересующем интервале времени.

Для реализации метода выбираются две точки x_0 и x_1 , такие что значения функции $f(x_0)$ и $f(x_1)$ имеют противоположные знаки, что указывает на наличие корня в интервале между этими точками. Затем используется формула для вычисления новой точки x_2 по формуле:

$$x_2 = x_1 - f(x_1) \cdot \frac{x_1 - x_0}{f(x_1) - f(x_0)} \quad (1)$$

Эта формула является результатом нахождения точки пересечения хорды, проходящей через точки $(x_0, f(x_0))$ и $(x_1, f(x_1))$ с осью x .

Процесс повторяется, при каждой итерации обновляя одну из границ интервала, в зависимости от знака значения функции в новой точке, до тех пор, пока разность между последовательными приближениями не станет меньше заданной точности. Это позволяет постепенно сужать интервал и приближаться к истинному корню функции.

В модели системы использованы два популярных метода резервирования: метод постоянного дублирования и метод ненагруженного дублирования замещением [2–4]. Кроме того, в систему включен участок без резервирования.

Таким образом, моделируемая система состоит из трех последовательно соединенных участков.

1. Участок с постоянным дублированием. Основной и резервный блоки работают параллельно. В случае выхода из строя основного блока, резервный немедленно берет на себя его функции, что позволяет минимизировать время простоя.

2. Участок с ненагруженным дублированием замещением. Резервный блок находится в режиме ожидания и не выполняет активных функций до момента выхода из строя основного блока. В случае неисправности основного блока резервный блок

активируется и замещает основной, что требует некоторого времени на переключение.

3. Участок без резервирования. Блоки этого участка функционируют без дополнительных мер резервирования. При выходе из строя любого блока этого участка восстановление системы невозможно без внешнего вмешательства для ремонта или замены компонента.

Основным показателем надежности такой системы является функция готовности – вероятность того, что система окажется работоспособной в произвольно выбранный момент времени. При длительной эксплуатации для оценки надежности используется коэффициент готовности системы, которому равна функция готовности в стационарном режиме. Коэффициент готовности показывает эффективность работы системы резервирования и обслуживания, а также ее способность восстанавливаться после отказов.

Коэффициент готовности системы равен произведению коэффициентов готовности всех участков. Для моделируемой системы коэффициент готовности определяется выражением:

$$K_C = K_1 K_2 K_3, \quad (2)$$

где K_1 - коэффициент готовности участка системы без резервирования блоков,

K_2 - коэффициент готовности участка системы с постоянным дублированием,

K_3 - коэффициент готовности участка системы с ненагруженным дублированием замещением.

Коэффициенты готовности отдельных участков зависят от количества элементов, входящих в участок, и интенсивностей их отказов.

Коэффициент готовности участка без резервирования описывается формулой:

$$K_1 = (1 + \lambda_{\text{сум}1} \tau)^{-1}, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{сум}1}$ – сумма интенсивностей отказов элементов данного участка.

Коэффициент готовности для участка с постоянным дублированием описывается формулой:

$$K_2 = \left(1 + \frac{2(\lambda_{\text{сум}2} \tau)^2}{1 + 2\lambda_{\text{сум}2} \tau}\right)^{-1}, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{сум}1}$ – сумма интенсивностей отказов элементов данного участка.

Коэффициент готовности для участка с ненагруженным дублированием замещением определяется выражением:

$$K_3 = \left(1 + \frac{\lambda_{\text{сум}3} \tau^2}{1 + \lambda_{\text{сум}3} \tau}\right)^{-1}, \quad (5)$$

где $\lambda_{\text{сум}3}$ – сумма интенсивностей отказов элементов данного участка.

При определении времени восстановления системы коэффициент готовности системы будет определяться как входной параметр.

При этом, метод хорд подразумевает, что истинный ответ находится в точке пересечения графика функции времени восстановления с осью абсцисс. В качестве переменной для этой функции используется время восстановления системы τ .

Тогда функция для вычисления τ_i , где входным параметром является предыдущее вычисленное значение τ_{i-1} имеет вид:

$$\tau_i = f(\tau_{i-1}) = K_C^{-1} - (1 + \lambda_{\text{сум}1} \tau_{i-1}) \times \left(1 + \frac{2(\lambda_{\text{сум}2} \tau_{i-1})^2}{1 + 2\lambda_{\text{сум}2} \tau_{i-1}}\right) \left(1 + \frac{(\lambda_{\text{сум}3} \tau_{i-1})^2}{1 + \lambda_{\text{сум}3} \tau_{i-1}}\right) \quad (6)$$

Для определения первого значения времени примем $\tau_0 = 0$.

Затем необходимо повторить это вычисление, каждый раз подставляя вместо τ_i значение функции τ_{i-1} , полученное в предыдущем шаге. При расчете необходимо предусмотреть принятие решения о достижении достоверного ответа для данной системы. Для этого можно определить разницу между текущим вычисленным значением τ_i и предыдущим τ_{i-1} . Если разница превысит заданное пороговое значение, вычисления следует продолжить. Однако, как только разница между τ_i и τ_{i-1} не будет превышать пороговое значение, вычисление следует прекратить и выдать время восстановления τ_i в качестве ответа.

Условие для достижения верного ответа:

$$\tau_i - \tau_{i-1} \leq \tau_{\text{пороговое}}.$$

III. РАЗРАБОТАННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для определения времени восстановления системы после отказов методом хорд разработана программа на языке JavaScript [5], которая предоставляет интерфейс для ввода интенсивности отказов элементов и коэффициента готовности системы, а также для отображения результата вычислений. Последовательность действий при использовании программы представлена на рисунках 2 – 4. Использование JavaScript позволяет использовать Web браузер без установки дополнительного программного обеспечения.

Для того, чтобы рассчитать время восстановления восстанавливаемой резервированной РЭС необходимо выполнить следующие действия.

1. Условно разделить систему на участки с последовательным соединением элементов: последовательный участок (без резервирования), участок постоянного дублирования, участок ненагруженного дублирования замещением (рисунок 2).

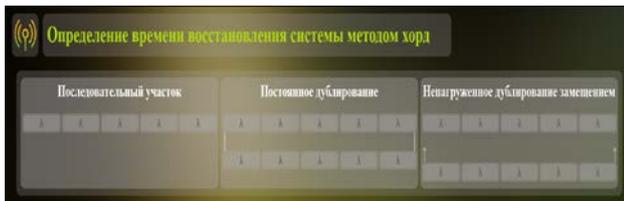


Рисунок 2 – Построение структурной схемы надежности восстанавливаемой системы

На участке последовательного соединения элементов (без резервирования) предусмотрено пять горизонтально расположенных ячеек для ввода интенсивностей отказов элементов. На участках постоянного дублирования и ненагруженного дублирования замещением также доступны пять основных ячеек для ввода данных.

2. Заполнить элементы соответствующих участков интенсивностями отказов « λ » (рисунок 3). Если в схеме нет каких-либо участков (элементов), то интенсивность отказов для этих участков (элементов) заполнять не нужно. Для того чтобы заполнить элемент интенсивностью его отказа, необходимо в области требуемого элемента, ввести число и выбрать степень числа 10, умноженного на введенное число. Чтобы указать степень числа 10, необходимо навести курсор на число «10n», после чего появится меню, в котором указывается требуемая степень. Программное обеспечение позволяет при заполнении дробных чисел, например: 2.3, использовать как точку, так и запятую.



Рисунок 3 – Ввод интенсивности отказа элемента восстанавливаемой РЭС

3. Ввести значение коэффициента готовности системы в соответствующее поле (рисунок 4) и нажать кнопку «Расчет». В случае ввода некорректных данных кнопка «Расчет» подсвечивается красным цветом и тогда, необходимо проверить правильность введенных данных и исправить ошибки.

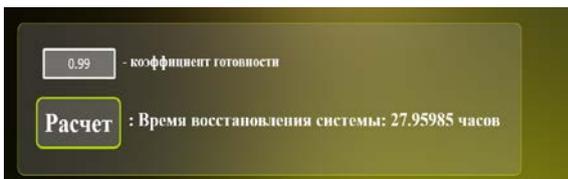


Рисунок 4 – Поле ввода коэффициента готовности системы и результаты расчета времени восстановления системы

На рисунке 5 показано окно программы при расчете времени восстановления для одного из вариантов построения системы.

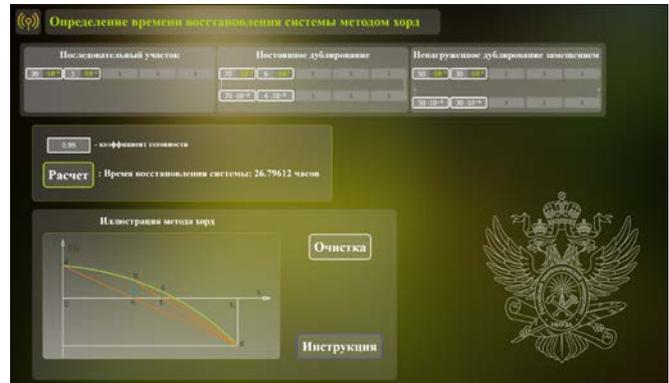


Рисунок 5 – Пример использования программы

В программу были интегрированы следующие возможности регулирования настроек:

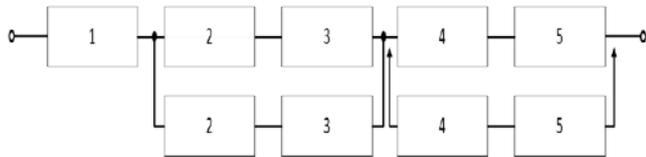
- отключение анимации;
- отключение показа инструкции при запуске программы;
- отключение показа логотипа;
- отображение полного ответа (без использования функции округления);
- периодический вывод вычислений в консоль браузера;
- установление времени T_a (рисунок 1);
- установление порогового значения $\tau_{\text{пороговое}}$;
- установление максимального количества вычислений.

Кроме того, программа защищена от введения неправильных исходных данных.

В качестве примера использования программы для определения времени восстановления системы методом хорд рассчитаем зависимость коэффициента готовности от времени восстановления земной станции спутниковой связи. Станция включает в себя антенну с системой наведения, модем, маломощный усилитель с понижающим преобразователем частоты (МШУ и ПЧ), возбудитель передатчика и повышающий преобразователь частоты с усилителем мощности (ПЧ и УМ). Модем и маломощный усилитель зарезервированы методом замещения, в то время как возбудитель передатчика и преобразователь частоты с усилителем мощности зарезервированы по схеме постоянного резервирования (рисунок 6).

В результате расчетов по программе получены зависимости коэффициента готовности от времени восстановления схемы (рисунок 6) для четырех вариантов значений интенсивностей отказов элементов: антенна с системой наведения 10^{-7} ч^{-1} , возбудитель передатчика $5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, МШУ и ПЧ $6 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, модем 10^{-5}

ч^{-1} и 10^{-6}ч^{-1} , ПЧ и УМ 10^{-5}ч^{-1} и $5 \cdot 10^{-5} \text{ч}^{-1}$. Графики зависимостей представлены на рисунке 7.



1 – антенна с системой наведения, 2 - модем, 3 - малошумящий усилитель с понижающим преобразователем частоты (МШУ и ПЧ), 4 - возбуждатель передатчика, 5 - повышающий преобразователь частоты с усилителем мощности (ПЧ и УМ)

Рисунок 6 – Структурная схема надежности земной станции спутниковой связи

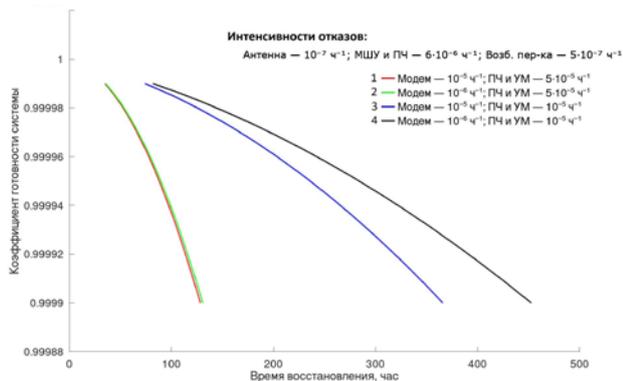


Рисунок 7 – Графики зависимости коэффициента готовности от времени восстановления системы для разных интенсивностей отказов

Данные о коэффициентах готовности для различных вариантов значений интенсивностей отказов элементов схемы, приведенной на рисунке 6 и времени восстановления представлены в таблице.

Таблица 1 - Значения коэффициента готовности

Вариант значений интенсивностей отказов	Время восстановления, час			
	50	100	120	300
1	0.9999816	0.9999369	0.9999117	
2	0.9999820	0.9999390	0.9999147	
3		0.9999852	0.999981	0.9999273
4		0.9999873	0.999984	0.9999458

Из графиков, приведенных на рисунке 7 и данных таблицы 1, следует, что коэффициент готовности

возрастает при уменьшении времени восстановления. Кроме того, для заданного времени восстановления коэффициент готовности увеличивается при уменьшении интенсивности отказов элементов, в рассматриваемом примере модема и ПЧ и УМ.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение метода хорд оказалось эффективным при расчете времени восстановления РЭС. Разработанная программа позволяет моделировать надежность восстанавливаемых систем при различных методах резервирования и значениях интенсивности отказов элементов.

Выявлены зависимости коэффициента готовности от времени восстановления и интенсивности отказов. Результаты моделирования могут быть использованы для оптимизации структуры РЭС, совершенствования методов резервирования и для разработки стратегий, направленных на минимизацию времени восстановления при критических отказах.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. С-Пб.: БХВ-Петербург; 2008. 704 с. ISBN: 978-5-94157-541-1
- [2] Jung S., Choi J.P. End-to-end reliability of satellite communication network systems. IEEE Systems Journal. 2021;15(1):791-801. DOI: 10.1109/jsyst.2020.2980760.
- [3] Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П., Скрипачев В.О. Анализ эффективности методов обеспечения надежности ретранслятора спутника связи. Russian Technological Journal. 2023;11(1):51–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-51-59>
- [4] Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П. Оценка эффективности скользящего резервирования радиоэлектронных средств. Russ. Technol. J. 2023;11(5):1–9. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-45-53>
- [5] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024663945 Российская Федерация. Программа расчета времени восстановления радиоэлектронных средств/ Семёнова О.В., Гельфман Т.Э., Цаплин М.С., Пирхавка А.П.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА Российский технологический университет». – Заявка № 2024662250; дата поступления 31.05.2024; дата гос. регистрации 14.06.2024.

Modeling of recoverable radio-electronic systems with redundancy

Tatyana Gelfman, Alexey Pirkhavka, Vladimir Skripachev, Mikhail Tsaplin

time, maintainability, redundancy, failure rate, availability factor, chord method, software.

Abstract. The paper presents an approach to modeling of recoverable radio-electronic systems (RES) with redundancy. One of the reliability criteria of RES is their recoverability. The influence of recoverability depends on the laws of distribution of failures and recoveries of RES elements. The peculiarities of application of the chord method in solving the problem of determining the RES recovery time, taking into account different redundancy scenarios, are considered. It is shown that the system recovery time after failures is a critical indicator in the field of reliability, since the system readiness to fulfill its functions in normal and critical situations depends on it. The calculation of the system availability factor is shown, which is equal to the product of availability factors of three sequentially connected sections that make up the RES model. To calculate the availability factor, software in JavaScript language is realized. The peculiarities of its operation are noted. As an example, the calculation of the dependence of the availability factor on the recovery time of a satellite earth station is given. The approach proposed in the article can be used to optimize the structure of RES, improve redundancy methods, as well as minimize the recovery time in critical failures.

Keywords: modeling, satellite communication system, radio-electronic system, reliability, Monte Carlo method, recovery

REFERENCES

- [1] Polovko A.M., Gurov S.V. Osnovy teorii nadezhnosti. S-Pb.: BHV-Peterburg; 2008. 704 s. ISBN: 978-5-94157-541-1
- [2] Jung S., Choi J.P. End-to-end reliability of satellite communication network systems. IEEE Systems Journal. 2021;15(1):791-801. DOI: 10.1109/jsyst.2020.2980760.
- [3] Gelfman T.E., Pirkhavka A.P., Skripachev V.O. Analysis of the effectiveness of methods for ensuring the reliability of a communication satellite transponder. Russian Technological Journal. 2023;11(1):51–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-51-59>.
- [4] Gelfman T.E., Pirkhavka A.P. Evaluation of the effectiveness of sliding redundancy of radioelectronic facilities. Russian Technological Journal. 2023;11(5):45-53. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-45-53>.
- [5] Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM 2024663945 Rossijskaja Federacija. Programma rascheta vremeni vosstanovlenija radioelektronnyh sredstv/ Semjonova O.V., Gel'fman T.E., Caplin M.S., Pirkhavka A.P.; zajavitel' i pravoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija «MIRJeA Rossijskij tehnologicheskij universitet». – Zajavka № 2024662250; data postuplenija 31.05.2024; data gos. registracii 14.06.2024.