

УДК 004.9:629.423.1

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.041](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.041)

Прогнозирование стоимости электроэнергии и состояния изоляции электрооборудования

Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный государственный университет путей сообщения", Хабаровск, Российская Федерация

Резюме: В работе рассматриваются вопросы применения метода анализа временных рядов для прогнозирования стоимости электроэнергии и оценки состояния изоляции силовых цепей электровоза. Предложенный в работе подход позволяет на научной основе спланировать объем средств, выделяемых на оплату электроэнергии, а также принять своевременные мероприятия, направленные на восстановление изоляции и исключить причины пожаров, возникающих на локомотивах. Анализ временных рядов выполнен с помощью прикладной программы, позволяющей оценить тенденцию изменения рассматриваемых показателей. Также предложено устройство для мониторинга состояния изоляции силовых цепей электровоза, в котором реализована разработанная программа прогнозирования временных рядов. Установка описанного в работе устройства на локомотив позволит своевременно оценить текущее и прогнозное состояние изоляции, а также принять своевременные меры по её восстановлению. Актуальность проблемы диагностики состояния изоляции обусловлена процессами старения основных производственных фондов (станков и оборудования) на промышленных предприятиях, которая требует принятия своевременных мер по восстановлению состояния изоляции силового электрического оборудования. Прикладная программа реализована в пакете *MatLab* и используется для прогнозирования стоимости электроэнергии. Для расширения возможностей применения прикладной программы в других приложениях произведено преобразование исходного кода программы в код, записанный на языке высокого уровня Си. Полученная таким образом программа используется в микроконтроллере PIC18F452 для оценки состояния изоляции силовых цепей электровоза.

Ключевые слова: прогнозирование временных рядов, метод сингулярного спектрального анализа, сингулярное разложение, стоимость электроэнергии, состояние изоляции.

Для цитирования: Кулинич Ю.М., Шухарев С.А. Прогнозирование тенденции развития энергетики железнодорожного транспорта. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/KulinichShuharev_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.041

Forecasting the cost of electricity and the state of insulation of electrical equipment

Y.M. Kulinich, S.A. Shuharev

*Far Eastern State Transport University,
Khabarovsk, Russian Federation*

Abstract: The paper deals with the application of the method of time series analysis to predict the cost of electricity and assess the state of insulation of power circuits of an electric locomotive. The proposed approach makes it possible, on a scientific basis, to plan the amount of funds allocated to pay for electricity, as well as to take timely measures aimed at restoring insulation and excluding the causes of

fires that occur on locomotives. Time series analysis was carried out with the help of an application program that allows assessing the trend of changes in the indicators under consideration. A device for monitoring the state of insulation of power circuits of an electric locomotive is also proposed, in which the developed program for forecasting time series is implemented. Installing the device described in the work on the locomotive will allow timely assessing the current and predicted state of insulation, as well as taking timely measures to restore it. The urgency of the problem of diagnosing the state of insulation is due to the aging processes of fixed assets (machine tools and equipment) at industrial enterprises, which requires timely measures to restore the state of insulation of power electrical equipment. The application program is implemented in the MatLab package and is used to predict the cost of electricity. To expand the possibilities of using the application in other applications, the source code of the program was transformed into the code written in the high-level C language. The program obtained in this way is used in the PIC18F452 microcontroller to assess the state of the insulation of the power circuits of an electric locomotive.

Keywords: time series forecasting, singular spectral analysis method, singular decomposition, electricity cost, insulation condition.

For citation: Kulinich Y.M., Shuharev S.A. Forecasting the development trend of railway energy. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: : https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/KulinichShuharev_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.041 (In Russ).

Введение

Целью работы является создание прикладной программы для прогнозирования стоимости электроэнергии, а также программы, написанной на языке высокого уровня Си, используемой в микроконтроллере PIC18F452 для определения состояния изоляции силовых цепей электровоза переменного тока. Прогнозная оценка стоимости электроэнергии позволяет спланировать как семейный бюджет, так и необходимый в будущем объем средств предприятия, предназначенный для оплаты электроэнергии. При решении задачи определения состояния изоляции силовых цепей электровоза основная роль заключается в надежном прогнозировании и оценке состояния силовых цепей, оцениваемой по величине тока утечки изоляции, которая зависит от текущего технического состояния каждого локомотива. Решение задачи прогнозирования состояния изоляции позволит существенно повысить надежность и работоспособность электровоза. Прогнозирование состояния изоляции базируется на основе обработки первичной информации о токах утечки, представляемой в виде временных рядов.

Предлагаемая вниманию читателей работа является итогом многолетней работы авторов в качестве технических экспертов по выявлению причин и анализа возникновения пожаров на локомотивах Дальневосточной и Забайкальской железных дорог. Анализу причин возникновения пожаров, связанных с ослаблением изоляции, посвящены ранее опубликованные работы авторов в ведомственных журналах [1, 2].

Алгоритм SSA-метода

Для решения поставленных задач используется метод анализа временных рядов, позволяющий спрогнозировать будущие значения ряда. Для этого можно использовать метод сингулярного спектрального анализа *SSA (Singular Spectrum Analysis)*. В последнее время этому методу уделяется много внимания благодаря возможности его применения во многих областях знаний [3], основной мотивацией для использования *SSA*-метода является то, что в отличие от других методов анализа он обеспечивает получение достоверных результатов без предварительного анализа временного ряда относительно

его стационарности и линейности [4]. Например, SSA-метод был успешно применен для получения трендов электрических сигналов и для разложения биологических сигналов в сумму интерпретируемых компонент [5]. Кроме того, SSA-метод эффективен при анализе как стационарных, так и нестационарных сигналов без ограничения длины анализируемого временного ряда. Одновременное выделение тренда и прогноз структурных изменений временного ряда входит в число основных возможностей метода SSA-метода.

Базовый алгоритм SSA-метода основан на анализе временного ряда $S_N = (s_n, n = 1, \dots, N)$ конечной длины N (например, дискретизированный сигнал) и представлении значений ряда S_N в виде суммы интерпретируемых компонент. Эта задача выполняется последовательно в два этапа: разложения и восстановления [5].

1. Разложение

Вложение. В процессе выполнения этого шага производится преобразование исходного одномерного временного ряда S_N , состоящего из N выборок, в последовательность из $K = N - L + 1$ векторов-столбцов вложения длиной L , где $1 < L < N$ – размерность вложения. Длина окна вложения L выбирается, как правило, равной половине длины N анализируемого ряда S_N в диапазоне $[2 \dots N/2 - 1]$. В результате выполнения процедуры вложения образуется траекторная матрица, выраженная в виде:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & \dots & s_K \\ s_2 & s_3 & \dots & s_{K+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_L & s_{L+1} & \dots & s_N \end{pmatrix} = [X_1, \dots, X_K], \quad (1)$$

где каждый столбец $X_1 - X_K$ матрицы \mathbf{X} является вектором вложения и получается путем применения метода скользящего окна длиной L к временному ряду S_N .

Траекторная матрица \mathbf{X} является ганкелевой матрицей, имеющей одинаковые элементы относительно ее диагонали, т.е. $i + j = \text{const}$, где i и j являются, соответственно, индексами строк и столбцов. Существенным параметром, определяющим процедуру вложения, является длина окна L , оптимальный выбор которого зависит от специфики временных рядов и постановки задачи исследования.

Сингулярное разложение. Сингулярное SVD-разложение (*Singular Value Decomposition*) [6] является математической основой первого этапа разложения, в процессе которого выполняется сингулярное разложение траекторной матрицы \mathbf{X} .

SVD-разложение некоторой вещественной $L \times K$ матрицы \mathbf{X} представляет эту матрицу как сумму L взвешенных ортогональных (не обязательно ганкелевых) матриц в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^L \mathbf{X}_i \\ \mathbf{X}_i &= \sigma_i u_i v_i^T, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_L)$ – диагональная матрица, в которой сингулярные числа σ_i расположены в убывающем порядке ($\sigma_1 \geq \sigma_L$);

u_i и v_i – соответственно левые и правые сингулярные векторы, соответствующие столбцам ортогональных матриц \mathbf{U} и \mathbf{V} .

SVD-разложение траекторной матрицы \mathbf{X} может быть реализовано также через собственные значения ковариационной матрицы $\mathbf{C} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$, которая может быть представлена в виде:

$$\tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^T, \quad (3)$$

где $\mathbf{\Lambda}$ – диагональная матрица собственных значений, в которой i – е собственное значение $\lambda_i = \sigma_i^2$;

\mathbf{U} – ортонормированная система собственных векторов ковариационной матрицы \mathbf{C} , соответствующих собственным значениям λ_i .

Правые сингулярные векторы матрицы $\mathbf{V} = (v_1, \dots, v_L)$ можно рассчитать по значениям \mathbf{X} и \mathbf{U} как:

$$v_i = \mathbf{X}^T u_i / \sigma_i \quad (4)$$

В принятой терминологии $\sqrt{\lambda_i}$ называют сингулярными числами, а u_i и v_i – соответственно левыми и правыми сингулярными векторами ковариационной матрицы \mathbf{C} . Таким образом, в соответствии с (2) сингулярное разложение траекторной матрицы \mathbf{X} можно представить в виде суммы элементарных матриц:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \dots + \mathbf{X}_L \quad (5)$$

Вклад i – го собственного значения λ_i в формирование траекторной матрицы \mathbf{C} определяется отношением:

$$CC_{i=} \sigma_i^2 / \sum_{j=1}^L \sigma_j^2, \quad (6)$$

которое называется сингулярным спектром временного ряда.

2. Восстановление

Группировка. Суть группировки состоит в выборе главных аддитивных компонент анализируемого ряда (5) и в уменьшении размерности траекторной матрицы с использованием линейного ортогонального преобразования. Применение этого метода позволяет сгладить исходный временной ряд, снизить уровень случайных возмущений и повысить отношение сигнал/шум.

Во время шага группировки производится разделение набора из L элементарных матриц \mathbf{X}_i ($i = 1, \dots, L$) в r непересекающихся групп и суммировании матриц в каждой группе [7]. В результате группировки происходит преобразование траекторной матрицы \mathbf{X} к следующему виду:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \sum_{k=1}^r \mathbf{X}_{I_k}, \quad (7)$$

где $\mathbf{X}_{I_k} = \sum_{i \in I_k} \mathbf{X}_i$ – результирующая матрица группы.

Процедура выбора множеств I_k ($k = 1, \dots, r$) называется группировкой. Группы I_k формируются на основе анализа информации, содержащейся в сингулярном спектре CC_i временного ряда. Группировка выполняется на основе выбора нескольких r главных компонент ряда, имеющих наибольшее значение в сингулярном спектре CC_i временного ряда, т.е. для дальнейшего анализа из R компонент ряда (5) остаются лишь первые r . Таким образом, разложение ряда (5) может быть записано в сгруппированном виде:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \tilde{\mathbf{X}}_{I_1} + \dots + \tilde{\mathbf{X}}_{I_r} \quad (8)$$

Такой способ получения последовательности (8) называется SSA-сглаживанием исходного временного ряда S_N по первым r компонентам.

Диагональное усреднение. На последнем шаге SSA-анализа происходит преобразование каждой матрицы сгруппированного разложения \mathbf{X}_{I_k} в новый временной ряд длины N [7]. Усреднение по поперечным диагоналям матрицы \mathbf{X}_{I_k} предназначено для решения задачи нахождения временного ряда \mathbf{X}^k , для которого траекторная матрица размером $L \times K$ в наибольшей степени приближена к \mathbf{X}_{I_k} по критерию минимальной величины среднеквадратического отклонения. Другими словами, диагональное усреднение матрицы $\mathbf{X}_{I_k} = x_{i,j}$ приводит к получению серии элементов временного ряда $x_n^k, (n = 1, \dots, N)$ в соответствии с выражениями:

$$x_n^k = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x_{m,n-m+1} & \text{где } 1 \leq n < L; \\ \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L x_{m,n-m+1} & \text{где } L \leq n < K; \\ \frac{1}{N-n+1} \sum_{m=n-K+1}^n x_{m,n-m+1} & \text{где } K+1 \leq n < N. \end{cases} \quad (9)$$

Это диагональное усреднение, называемое процессом ганкелизации, также может применяться к каждой матрице \mathbf{X}_i . Процесс диагонального усреднения обеспечивает представление исходного временного ряда S_N в ряд \tilde{S}_N той же длины N .

3. Прогнозирование временной последовательности

Прогнозирование значений для исходного временного ряда $S_N = (s_i)_{i=1}^N$ сводится к построению ряда $\tilde{S}_{N+1} = (s_i)_{i=1}^{N+p}$, в котором прогноз на следующие p точек осуществляется как применение p раз операции прогноза на одну точку.

Если известна структура временного ряда, то можно продолжить эту структуру и тем самым спрогнозировать продолжение временного ряда [8]. В SSA-методе структура временного ряда задается линейной рекуррентной формулой (ЛРФ), описывающей этот ряд. Известно [9], что любой временной ряд, являющийся суммой произведений полиномов, экспонент и гармоник может быть представлен ЛРФ и начальными условиями. Определив с помощью SSA-метода значения коэффициентов ЛРФ, можно аналитически рассчитать продолжение временного ряда, т.е. осуществить рекуррентное продолжение такого ряда.

Прогнозирование одношагового продолжения \tilde{x}_{N+1} ряда \tilde{S}_{N+1} можно осуществить с помощью ЛРФ в соответствии с выражением [7]:

$$\tilde{x}_{N+1} = \sum_{k=1}^{L-1} a_k x_{N+1-k} = a_1 x_N + a_2 x_{N-1} + \dots + a_{L-1} x_{N-L+2}; \quad (10)$$

где a_k – коэффициенты ЛРФ;
 x_{N+1-k} – значения временного ряда.

Представим сгруппированную матрицу \mathbf{U} ортонормированных собственных векторов ковариационной матрицы \mathbf{C} в виде [10]:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} u_1^{(i_1)} & u_1^{(i_2)} & \dots & u_1^{(i_r)} \\ u_2^{(i_1)} & u_2^{(i_2)} & \dots & u_2^{(i_r)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{L-1}^{(i_1)} & u_{L-1}^{(i_2)} & \dots & u_{L-1}^{(i_r)} \\ u_L^{(i_1)} & u_L^{(i_2)} & \dots & u_L^{(i_r)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{L-1}^r \\ u_1^r \end{pmatrix} \quad (11)$$

Введем следующие обозначения: пусть матрица \mathbf{U}_{L-1}^r размером $(L-1) \times r$ получена из первых $L-1$ строк матрицы \mathbf{U} , а вектор-строка u_1^r длиной r является последней строкой матрицы \mathbf{U} .

В этом случае коэффициенты $a_k = (a_{L-1}, \dots, a_1)$ ЛРФ могут быть получены путем перемножения матрицы \mathbf{U}_{L-1}^r и вектора u_1^r в соответствии с выражением:

$$\frac{1}{1-v^2} \left[\mathbf{U}_{L-1}^r * (u_1^r)^T \right] = (a_{L-1}, \dots, a_1)^T, \quad (12)$$

где $v^2 = (u_L^{i_1})^2 + \dots + (u_L^{i_r})^2 < 1$ – коэффициент вертикальности пространства.

Формально в продолжении исходного ряда S_N участвуют все $L \times r$ элементов ортогональной матрицы \mathbf{U} . Однако, в соответствии с (10), \tilde{x}_{N+1} продолжение ряда определяется только последними $L-1$ значениями сглаженного ряда \tilde{S}_N .

Результаты математического моделирования

Описанный SSA-метод анализа временного ряда реализован программно в пакете *MatLab* [11]. В разработанную программу включены все описанные выше этапы преобразования. Для анализа тенденций изменения стоимости электроэнергии использованы значения одноставочного тарифа на электроэнергию для городского населения, представляемые Дальневосточной энергетической компанией «Хабаровскэнергосбыт».

Анализируемые данные представляют собой временной ряд значений стоимости 1 кВт·часа электроэнергии, относящиеся к периоду с января 2008 года по декабрь 2020 года. Прогнозные значения ряда спрогнозированы для 2021 года. Результаты моделирования показаны на Рисунке 1.

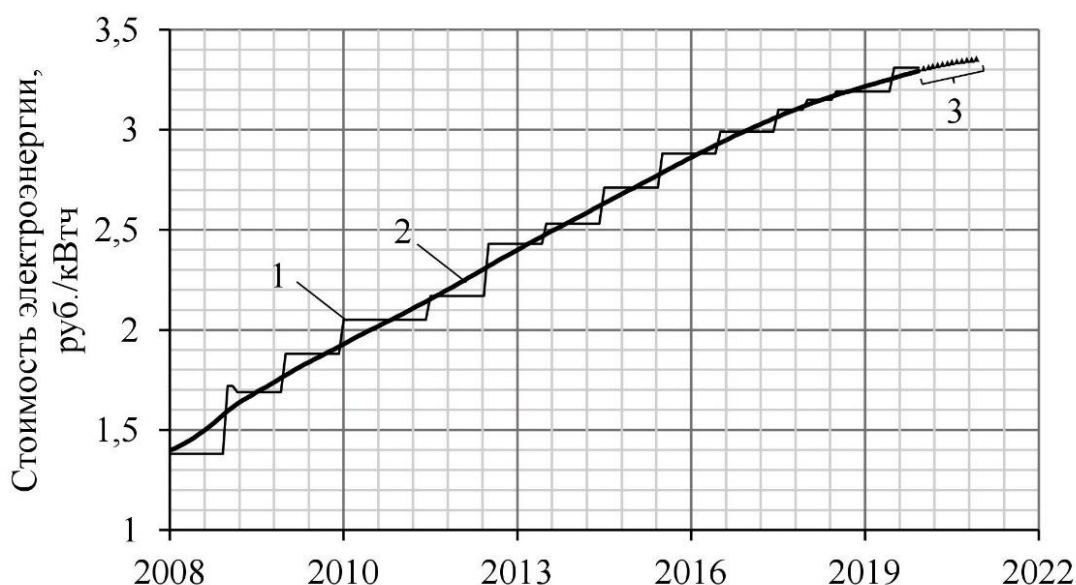


Рисунок 1 – Результаты прогнозирования стоимости электроэнергии в пакете *MatLab*

Figure 1 – Results of forecasting the cost of electricity in the *MatLab* package

Линия 1 Рисунка 1 соединяет точки, соответствующие значениям исходного ряда тарифов, линия 2 получена программно как результат группировки и диагонального усреднения исходного временного ряда. Фрагмент 3 соответствует 12-ти значениям месячного тарифа, прогнозируемого на 2021 год. На декабрь 2021 года спрогнозирован тариф на уровне 3,35 руб./кВтч.

Для оценки качества прогнозирования проведем сравнительный анализ данных, полученных с помощью разработанной программы, с аналогичными данными, посчитанными специализированной программой *CaterpillarSSA* [12]. В качестве исходных данных в обоих случаях использовалась одинаковая входная информация о тарифах, представленная в виде временного ряда. Прогнозные значения тарифа на 2021 год, полученные в программе *CaterpillarSSA*, приведены на Рисунке 2.

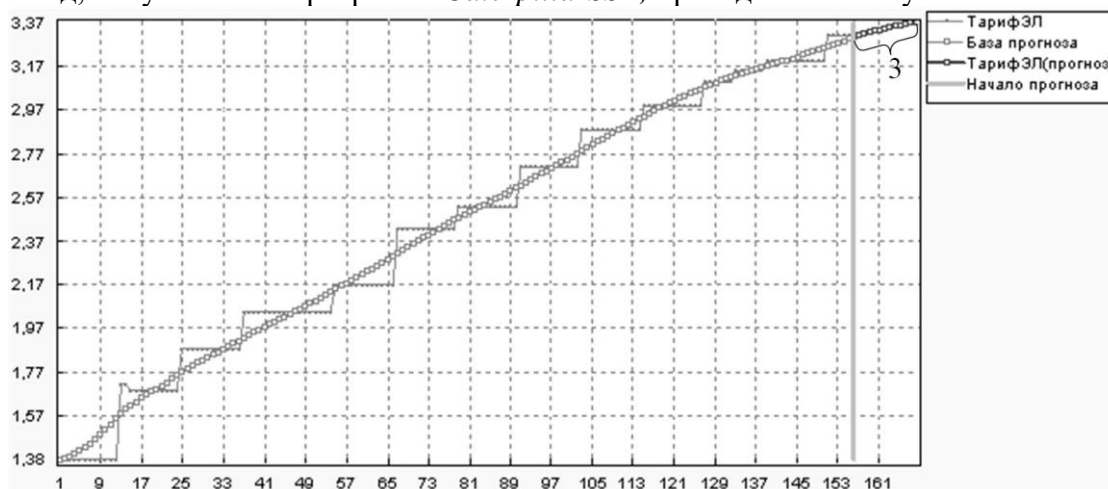


Рисунок 2 – Результаты прогнозирования стоимости электроэнергии в пакете программы *CaterpillarSSA*

Figure 2 – Results of forecasting the cost of electricity in the *CaterpillarSSA* package

Из сравнительного анализа Рисунков 1 и 2 следует, что прогнозируемые значения тарифов (фрагменты 3) практически совпадают. Это свидетельствует о правомерности использования разработанной программы в задачах прогнозирования временных рядов.

Отличие разработанной программы от известного программного продукта *CaterpillarSSA* состоит в том, что эта программа, реализованная в среде *MatLab*, может быть преобразована в другую программу, записанную на языке Си. Полученный код на языке Си предназначен для работы с микроконтроллером PIC18F452, являющимся основой автономного устройства для мониторинга состояния изоляции электровоза.

Новизна такого схемного решения подтверждена Патентом РФ [13]. Текущие и прогнозные состояния сопротивления изоляции отображаются на ЖКИ-индикаторе размером 320x240 пикселей (Рисунок 3).

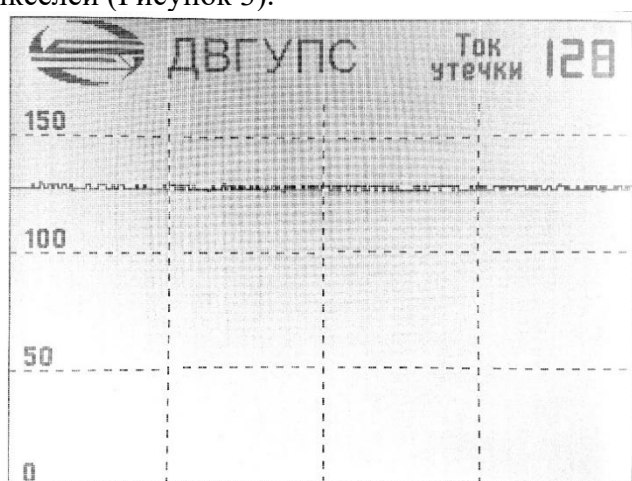


Рисунок 3 – Экран устройства для диагностики состояния изоляции силовых цепей
Figure 3 – Screen of the device for diagnosing the state of insulation of power circuits

При этом процесс старения изоляции характеризуется изменением во времени тока утечки. Этот процесс соответствует тенденциям изменения тарифа на электроэнергию, показанным на Рисунках 1 и 2.

Заключение

В результате выполненной работы установлено, что используемый при анализе временных рядов *SSA* метод является универсальным, т.е. может быть применен для определения тренда развития различных по природе процессов. Тенденция изменения тарифа на электроэнергию и состояние изоляции силовых цепей имеют одинаковый характер. В этой связи, для исследования динамики развития этих процессов в работе применена одинаковая методика, построенная на анализе данных временных рядов, которая позволяет спрогнозировать будущие значения исследуемых процессов. Разработанная прикладная программа позволяет спланировать необходимый объем средств, выделяемых на оплату электроэнергии. С помощью программы, записанной на языке высокого уровня Си для микроконтроллера PIC18F452, можно определить состояние изоляции силовых цепей электровоза переменного тока и спрогнозировать её будущее состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравчук В.В., Кулинич Ю.М., Понявкин Д.Ю. Причины пожаров на локомотивах. *Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта Дальневосточного региона тезисы докладов научно-технической конференции.* 1995:145.
2. Кравчук В.В., Кулинич Ю.М., Понявкин Д.Ю. Пожары продолжаютя. *Локомотив.* 1995;8:34-35.
3. Иванов В.В., Осетров Е.С. Прогнозирование суточных объемов пассажирских перевозок в Московском метрополитене. *Письма в ЭЧАЯ.* 2018;15(1):88-108.
4. Савин А.С., Хохлов А.А., Четов А.И. Анализ временных рядов в приложении к изучению поведения покупателей. *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ».* 2015;7(3). Доступно по: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN315.pdf>.
5. J. Harmouche, D. Fourer et al. The Sliding Singular Spectrum Analysis: a Data-Driven Non Stationary Signal Decomposition Tool. *IEEE Transactions on Signal Processing.* 2018;66(1):251-263.
6. Стрижов В.В. Методы выбора регрессионных моделей // М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской акад. наук. 2010.
7. Голяндина Н.Э. *Метод «Гусеница»-SSA: прогноз временных рядов: Учебное пособие.* 2004.
8. Варфоломеева А.А., Федорова В.П. Локальные методы прогнозирования с выбором метрики. *Машинное обучение и анализ данных.* 2012;1(3):367-375.
9. Степанов Д.В., Голяндина Н.Э. Варианты метода "Гусеница"-SSA для прогноза многомерных временных рядов. *Труды IV Международной конференции "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'05.* 2005:1831-1848.
10. И. В. Фадеев, Н. П. Ивкин и др. Авторегрессионные алгоритмы прогнозирования. *Машинное обучение и анализ данных.* 2011;1(1):92-103.
11. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. *СОЛОН-Пресс.* 2009.
12. N. Golyandina, E. Osipov. The "Caterpillar"-SSA method for analysis of time series with missing values. *Journal of Statistical Planning and Inference.* 2007;137(8):2642-2653.
13. Кулинич Ю.М., Малова Ю.Г. *Устройство для диагностики состояния изоляции силовых цепей.* Пат. 2590221. Российская Федерация, МПК: G01R 31/00. Заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ДВГУПС». 2015114733/28; заявл. 20.04.2015; опубл.10.07.2016. Бюл.№19.

REFERENCES

1. Kravchuk V.V., Kulinich Yu.M., Ponyavkin D.Yu. *Causes of fires on locomotives. Improving the efficiency of railway transport in the Far Eastern region abstracts of the scientific and technical conference.* 1995:145. (In Russ)
2. Kravchuk V.V., Kulinich Yu.M., Ponyavkin D.Yu. The fires continue. *Locomotive.* 1995;8:34-35. (In Russ)
3. Ivanov V.V., Osetrov E.S. Prediction of daily passenger traffic in the Moscow metro. *Letters in JINR.* 2018;15(1):88-108. (In Russ)
4. Savin A.S., Khokhlov A.A., Chetov A.I. Analysis of time series in the application to the study of customer behavior. *Internet journal "SCIENCE".* 2015;7(3). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN315.pdf>. (In Russ)
5. J. Harmouche, D. Fourer et al. The Sliding Singular Spectrum Analysis: a Data-Driven Non Stationary Signal Decomposition Tool. *IEEE Transactions on Signal Processing.* 2018;66(1):251-263.

6. Strizhov V.V. Regression Model Selection Methods. *Computing Center them. A.A. Dorodnitsyna Russian Acad. sciences*. 2010. (In Russ)
7. Golyandina N.E. *Caterpillar-SSA Method: Time Series Forecast: Tutorial*. 2004. (In Russ)
8. Varfolomeeva A.A., Fedorova V.P. Local forecasting methods with metric selection. *Machine Learning and Data Analysis*. 2012;1(3):367-375. (In Russ)
9. Stepanov D.V., Golyandina N.E. Variants of the "Caterpillar"-SSA method for forecasting multidimensional time series. *Proceedings of the IV International Conference "System Identification and Management Tasks" SICPRO'05*. 2005:1831-1848. (In Russ)
10. I.V. Fadeev, N.P. Ivkin and others. Autoregressive forecasting algorithms. *Machine Learning and Data Analysis*. 2011;1(1):92-103. (In Russ)
11. Dyakonov V.P. MATLAB 6/6.1/6.5 MATLAB 6 / 6.1 / 6.5 + Simulink 4/5 in mathematics and modeling. Complete user guide. *SOLOON-Press*. 2009. (In Russ)
12. N. Golyandina, E. Osipov. The "Caterpillar"-SSA method for analysis of time series with missing values. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2007;137(8):2642-2653.
13. Kulinich Yu.M., Malova Yu.G. *Device for diagnosing the state of insulation of power circuits*. Patent 2590221. Russian Federation. G01R 31/00. Applicant and patent holder «FESTU». stated 20.04.2015. published 10.07.2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кулинич Юрий Михайлович, д.т.н., профессор, профессор кафедры "Транспорт железных дорог, ФГБОУ ВО "Дальневосточный государственный университет путей сообщения", Хабаровск, Российская Федерация.
e-mail: kulinitich@rambler.ru
ORCID: [0000-0002-7725-8152](https://orcid.org/0000-0002-7725-8152)

Yuri M. Kulinich, Doctor Of Technical Science, Professor, Professor Of The Department "Railway Transportation", Federal State Budgetary Educational Institution Of Higher Education "Far Eastern State Transport University", Khabarovsk, Russian Federation.

Шухарев Сергей Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО "Дальневосточный государственный университет путей сообщения", Хабаровск, Российская Федерация.
e-mail: shuharevsa@gmail.com
ORCID: [0000-0001-7856-6651](https://orcid.org/0000-0001-7856-6651)

Sergey A. Shuharev, Candidate Of Technical Sciences, Docent Of The Department "Railway Transportation", Federal State Budgetary Educational Institution Of Higher Education "Far Eastern State Transport University", Khabarovsk, Russian Federation.