

## Математическая модель прогнозирования среднесуточного пробега локомотивов

О. О. Мухин✉

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ muhinoo@mail.ru

### Резюме

Одним из актуальных направлений совершенствования системы поддержки жизненного цикла тягового подвижного состава является повышение качества организации сервисного обслуживания. Несмотря на массовое обновление локомотивного парка железных дорог России, при достаточной мощности сервисных предприятий сохраняется длительный простой в ожидании планового ремонта, что приводит к непроизводительным потерям. Это связано со снижением точности планирования программы ремонта в условиях стремительного развития локомотивного комплекса и инфраструктуры (повышения скоростей движения, пропускной способности железных дорог), ввиду чего появляется необходимость актуализации существующей методики планирования ремонтов локомотивов. Автором на основе метода спектрального сингулярного анализа временных рядов SSA (Singular Spectrum Analysis) в программном пакете компьютерной алгебры Maple разработана и представлена математическая модель прогнозирования среднесуточного и линейного пробега локомотива. Произведена проверка адекватности результатов путем сопоставления полученных данных со значениями специализированной программы CaterpillarSSA. На примере локомотивного парка серии 3ЭС5К, эксплуатируемого в границах Восточного полигона, при планировании программы ремонта проведено сравнение результатов математической модели с методикой, действующей на российской сети железных дорог. Сделан вывод об эффективности разработанного решения. Математическая модель отличается от существующего метода тем, что позволяет учесть технико-технологические, сезонные и случайные факторы, негативно влияющие на достоверность прогноза, позволяет с большей точностью определить дату наступления соответствующего вида ремонта. Модель также может быть применена в отношении любого вида транспорта, для которого межремонтный период нормирован пробегом.

### Ключевые слова

тяговый подвижной состав, электровоз, ремонт локомотивов, планирование ремонтов, Singular Spectrum Analysis, среднесуточный пробег

### Для цитирования

Мухин О. О. Математическая модель прогнозирования среднесуточного пробега локомотивов / О. О. Мухин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 123–132. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).123-132

### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.03.2022 г.; поступила после рецензирования: 16.03.2022 г.; принята к публикации: 18.03.2022 г.

## Mathematical model for the locomotive average daily mileage forecasting

О. О. Mukhin✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ muhinoo@mail.ru

### Abstract

One of the urgent directions of improving the life cycle support system of traction rolling stock is through the improvement in the quality of the service organization. Despite the massive renewal of the locomotive fleet of Russian railways, with sufficient capacity of service enterprises, a long downtime still remains due to the wait for scheduled maintenance, which leads to unproductive losses. This becomes possible due to a decrease in the accuracy of the repair program planning service under the conditions of rapid development of the locomotive complex and infrastructure as well as the increasing traffic speeds and railway capacity. Which is why, there is a need to update the existing method of planning the locomotive repair request. Based on the method of spectral singular analysis of time series SSA (Singular Spectrum Analysis) in the Maple computer algebra software package, the author has developed and presented a mathematical model for predicting the locomotive average daily and linear runs. The adequacy of the results was verified by comparing the data obtained with the values of the specialized Caterpillar SSA program. Using the 3ES5K series locomotive fleet operated within the boundaries of the Eastern Polygon, when planning the repair program a comparison of the results of the mathematical model with the methodology operating on the railway network of JSC "Russian Railways" was carried out. The conclusion is made about the effectiveness of the developed solution. The mathematical model differs from the existing method by the possibility to consider technical, technological, seasonal and random factors that negatively affect the reliability of the forecast, allowing a more accurate determination of the date for the appropriate type of repair. The model can also be applied to any type of transport whose inter-repair period is normalized by mileage.

**Keywords**

traction rolling stock, electric locomotive, locomotive repair, repair planning, Singular Spectrum Analysis, average daily mileage of a locomotive

**For citation**

Mukhin O. O. Matematicheskaya model' prognozirovaniya srednesutochnogo probega lokomotivov [Mathematical model for the locomotive average daily mileage forecasting]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No. 1 (73), pp. 123–132. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).123-132

**Article Info**

Received: 09.03.2022; revised: 16.03.2022; accepted: 18.03.2022.

**Введение**

Задачей планово-предупредительной системы ремонта тягового подвижного состава является поддержка требуемого технического состояния узлов и оборудования, предупреждение отказов технических средств. По данным автоматизированного рабочего места для анализа отчетных и номерных данных (АРМ ОНД) в среднем за год текущий ремонт первого объема (ТР-1) проводится локомотивному парку ОАО «РЖД» 32019 раз, второго объема (ТР-2) – 2835, третьего (ТР-3) – 1073, средний ремонт (СР) – 724 и капитальный (КР) – 574. На качество организации сервисного обслуживания, безусловно, в первую очередь влияет точность планирования постановки локомотивов на ремонт, что предоставляет возможность определить необходимое наличие запасных частей, линейного оборудования, распределить объемы работ между сервисными компаниями, оценить трудоемкость процессов, всевозможные расходы [1].

При достижении соответствующего межремонтного пробега локомотив направляют на базу сервисного предприятия для ожидания очереди на ремонтную позицию. По данным информационных систем средний простой в ожидании ТР-1 составляет 1,3 сут, ТР-2 – 2,1 сут, ТР-3 – 5,1 сут, простой в ожидании заводских ремонтов СР – 13,3 сут и КР – 16,2 сут. Длительный простой приводит к финансовым потерям, вызванным не содержанием заданного количества локомотивов в эксплуатируемом парке, а потреблением электроэнергии, топлива в период ожидания («горячий простой»).

Ошибочно утверждать, что только вследствие некорректной программы ремонта возможен непроизводительный простой, существует множество технико-технологических, сезонных, случайных и административных факторов, в разной мере влияющих на соответствие плановой и фактической даты наступления нормативного пробега [1]. Сегодня приме-

няемая на сети ОАО «РЖД» методика планирования потребности в ремонтах не позволяет учесть вышеуказанные факторы, искомая дата определяется по значению среднего в текущем году среднесуточного пробега для каждого локомотива в парке. Еще не существует модуля планирования, интегрированного с информационными системами холдинга, расчет не полностью автоматизирован и производится в Microsoft Excel.

В рамках новой концепции поставки железнодорожной продукции на основе контракта жизненного цикла, в условиях стремительного развития инфраструктуры и локомотивного комплекса направление планирования программы ремонта подвижного состава до настоящего времени останется недостаточно исследованным. Более того, Стратегией развития транспортного машиностроения РФ на период до 2030 г. отмечена необходимость в переходе к новой системе планирования.

В целях повышения точности, автоматизации процесса планирования ремонтов, появляется необходимость в разработке математической модели прогнозирования среднесуточного и линейного пробегов, которая позволит получить достоверный результат с учетом влияния различных факторов.

**Анализ динамики среднесуточного пробега методом спектрального сингулярного анализа временных рядов**

Для решения поставленной задачи в работе использован метод спектрального сингулярного анализа временных рядов SSA (Singular Spectrum Analysis) [2, 3], результатом которого является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды, сезонные и другие периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты [2–7]. В настоящее время метод широко используется для определения состояния изоляции сило-

вых цепей электровозов переменного тока [8], прогнозирования стоимости электроэнергии [8, 9], грузоперевозок на железнодорожном транспорте [10], суточных объемов пассажирских перевозок в Московском метрополитене [11], и т.д., а также может быть использован в любых других областях науки [2–14].

Базовый алгоритм SSA основан на анализе временного ряда конечной длины и представлении значений ряда в виде суммы интерпретируемых компонент, состоит из двух основных этапов: вложение и восстановление [3–8]. Алгоритм реализован автором в программном пакете компьютерной алгебры Maple. Для построения и управления матрицами и векторами используются пакеты linalg, LinalgAlgebra, МТТ [15, 16].

На первом этапе выполняется преобразование исходного временного ряда из  $N$  значений в последовательность  $K = N - L + 1$  векторов-столбцов вложения протяженностью  $L$  [2, 8], где  $L$  – длина окна, как правило принимается в диапазоне от 2 до  $N/2 - 1$ . В результате образуется траекторная матрица  $L \times K$ , которая имеет следующий вид:

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

где  $s_1 - s_N$  – значения временного ряда.

Анализируемые данные представляют собой динамику среднесуточного пробега магистральных электровозов серии ЗЭС5К приписки Дальневосточной дирекции тяги с января 2015 по декабрь 2021 г., протяженностью  $N = 84$  месяца ( $S_{84}$ ), рис. 1.

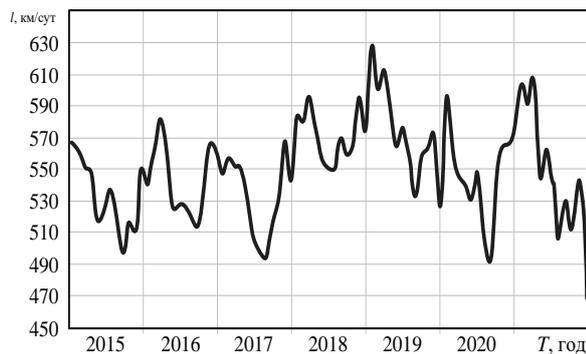


Рис. 1. Динамика среднесуточного пробега  
Fig. 1. Dynamics of average daily mileage

Длина окна  $L$  принимается равной 10, тогда  $K = 84 - 10 + 1 = 75$ . Исходные данные легко можно преобразовать в траекторную матри-

цу (1)  $10 \times 75$  с помощью команды Maple « $\mathbf{X} := (\text{matrix } L, K, (i, j) \rightarrow s_N [i - 1 + j])$ ».

Далее необходимо выполнить процедуру SVD-разложения (Singular Value Decomposition) траекторной матрицы  $\mathbf{X}$  [3–8], представленной как:

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

где  $\Sigma$  – диагональная матрица сингулярных чисел;  $\sigma_i$ ;  $u_i$ ,  $v_i$  – левые и правые сингулярные векторы ортогональных матриц  $U$  и  $V$ ;  $X_i$  – элементарная матрица, компонент траекторной матрицы  $\mathbf{X}$  [2, 3, 8].

SVD-разложение также может быть представлено в виде собственных значений ковариационной матрицы:

$$X X^T = U \Lambda U^T \quad (3)$$

где  $\Lambda$  – диагональная матрица собственных значений  $\lambda_i = \sigma_i^2$ ;  $U$  – ортонормированная система собственных векторов ковариационной матрицы.

В Maple уравнение (2) можно реализовать следующим образом « $U, \Sigma, V^T := \text{SingularValues}(\text{matrix}(\mathbf{X}), \text{output} = ['U', '\Sigma', 'V^T'])$ », а уравнение (3) как « $U, \Sigma, V^T := \text{SingularValues}(\text{matrix}(\mathbf{X} \cdot \text{transpose}(\mathbf{X})), \text{output} = ['U', '\Sigma', 'V^T'])$ » [15, 16].

Правый сингулярный вектор матрицы  $\mathbf{V}$  определяется как

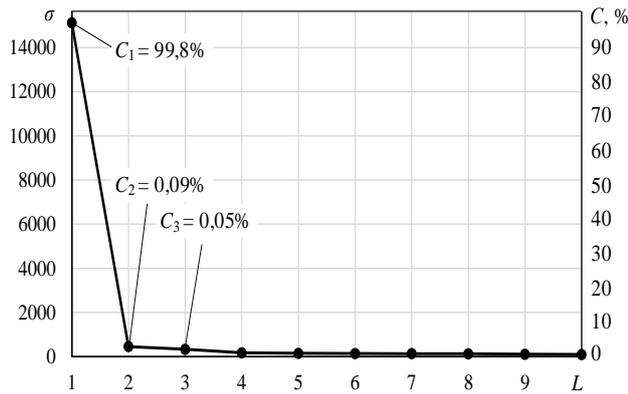
$$v_i = X^T u_i / \sigma_i$$

Таким образом, SVD-разложение траекторной матрицы  $\mathbf{X}$  можно представить в виде  $\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \dots + \mathbf{X}_{10}$ .

Сингулярный спектр временного ряда, определяющий вклад собственного значения  $\lambda_i$  в формирование траекторной матрицы  $\mathbf{X} \mathbf{X}^T$ , можно рассчитать следующим способом:

$$C_i = \sigma_i^2 / \sum_{j=1}^L \sigma_j^2 \quad (4)$$

На рис. 2 представлены значения сингулярного спектра, полученные по уравнению (4), собственных значений  $\sigma_i^2$  матрицы  $\mathbf{X}$  динамики среднесуточного пробега. Таким образом, наибольший вклад собственного значение в формирование временного ряда вносит первая компонента  $\mathbf{X}_1$  (99,8%), компонента  $\mathbf{X}_2$  (0,09%) характеризует сезонность в динамике,  $\mathbf{X}_3$  и далее – шум, случайные факторы.



**Рис. 2.** График зависимости собственных значений и сингулярного спектра  
**Fig. 2.** Graph of the dependence of eigenvalues and singular spectrum

После разложения наступает этап восстановления, на котором в первую очередь необходимо выполнить объединение набора из  $L$  элементарных матриц  $\mathbf{X}_i$  в  $r$  непересекающихся групп  $\mathbf{X}_{lk}$ , тогда представление матрицы  $\mathbf{X}$  принимает следующий вид:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \sum_{m=1}^r \mathbf{X}_{lk},$$

где  $\mathbf{X}_{lk}$  – результирующая матрица группы.

В данном случае количество непересекающихся групп принимается  $r = 4$ , т. е.  $\mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2$ ,  $\mathbf{X}_3 + \mathbf{X}_4$ ,  $\mathbf{X}_5 + \mathbf{X}_6$ ,  $\mathbf{X}_7 + \mathbf{X}_8$ .

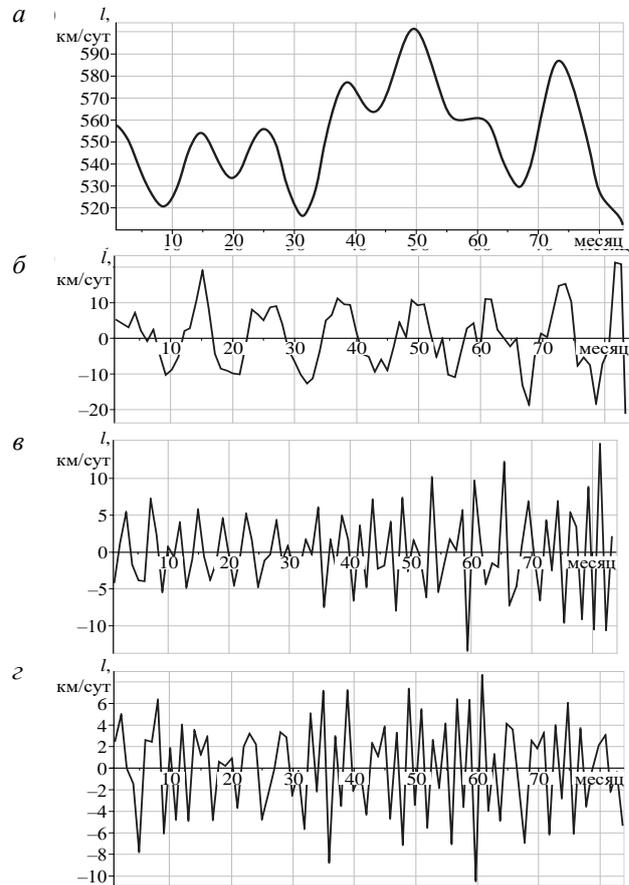
Далее необходимо произвести диагональное усреднение путем преобразования сгруппированной матрицы в новый временной ряд той же длины  $N$  по следующему выражению:

$$x_n^k = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x_{m,n-m+1} & \text{при } 1 \leq n < K \\ \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L x_{m,n-m+1} & \text{при } L \leq n < K \\ \frac{1}{N-n+1} \sum_{m=n-K+1}^n x_{m,n-m+1} & \text{при } K+1 \leq n < K \end{cases},$$

где  $x_{m,n-m+1}$  – элемент матрицы в соответствующей строке и столбце. Другими словами, процедура приводит к получению серии элементов  $x_n^k$  временного ряда. Диагональное усреднение также применяется в отдельности к каждой матрице группы  $\mathbf{X}_{lk}$  или  $\mathbf{X}_i$ .

На рис. 3 представлены результаты разложения динамики среднесуточного пробега на графики тренда ( $\mathbf{X}_{lk1}$ ), сезонной ( $\mathbf{X}_{lk2}$ ) и шумо-

вой компонент ( $\mathbf{X}_{lk3}$ ,  $\mathbf{X}_{lk4}$ ). Имея представление о наличии технико-технологических, сезонных и случайных факторов в динамике, появляется возможность с большей точностью произвести прогноз.



**Рис. 3.** Разложение динамики среднесуточного пробега: а) тренд динамики; б) сезонная компонента; в, г) шумовая компонента

**Fig. 3.** The dynamics layout of the average daily mileage: а) trend dynamics; б) seasonal component; в, г) noise component

### Прогнозирование среднесуточного пробега

Прогнозирование временного ряда на  $p$  точек вперед производится в соответствии с линейной рекуррентной формулой (ЛРФ):

$$\tilde{x}_{N+p} = \sum_{k=1}^{L-1} a_k x_{N+1-k},$$

где  $a_k$  – коэффициент ЛРФ;  $x_{N+1-k}$  – значение восстановленного временного ряда.

Матрица  $U$  ортонормированных собственных векторов матрицы  $XX^T$  можно представить в следующем виде:

$$U = \begin{pmatrix} u_1^{i_1} & u_1^{i_2} & \dots & u_1^{i_r} \\ u_2^{i_1} & u_2^{i_2} & \dots & u_2^{i_r} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ u_{L-1}^{i_1} & u_{L-1}^{i_2} & \dots & u_{L-1}^{i_r} \\ u_L^{i_1} & u_L^{i_2} & \dots & u_L^{i_r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{L-1}^r \\ u_1^r \end{pmatrix},$$

где  $U_{L-1}^r$  – матрица размером  $(L-1) \times r$ , полученная из первых  $L-1$  строк матрицы  $U$ ;  $u_1^r$  – вектор-строка длиной  $r$ , является последней строкой матрицы  $U$ .

Коэффициенты ЛРФ определяются по следующему выражению:

$$(a_{L-1}, \dots, a_1)^T = \frac{1}{1-v^2} \left[ U_{L-1}^r \cdot (u_1^r)^T \right],$$

где  $v$  – коэффициент вертикальности пространства, рассчитываемый по значениям нижней строки матрицы  $U$  [3, 8] как:

$$v^2 = (u_L^{i_1})^2 + \dots + (u_L^{i_r})^2.$$

На рис. 4 представлены результаты прогнозирования среднесуточного пробега электровозов, ожидаемое значение на конец января 2022 г. – 535,69 км/сут.

В целях верификации математической модели, разработанной в Maple, проведено сравнение полученных результатов среднесуточного пробега с результатами специализированной программы CaterpillarSSA. На рис. 5 изображен график анализируемого ряда [17–21]. Ожидаемый пробег в соответствии с CaterpillarSSA составляет 535,677 км/сут. Таким образом, разница в расчетах незначительна (0,003 %), что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Кроме того, в пользу достоверности прогноза, по данным АРМ ОНД фактический среднесуточный пробег для локомотивов серии 3ЭС5К по итогам января 2022 года составил 519,49 км/сут, ошибка прогнозирования 3,02 %.

Математическая модель также может быть использована для анализа и прогнозирования любого другого временного ряда.

Математическая модель также может быть использована для анализа и прогнозирования любого другого временного ряда.

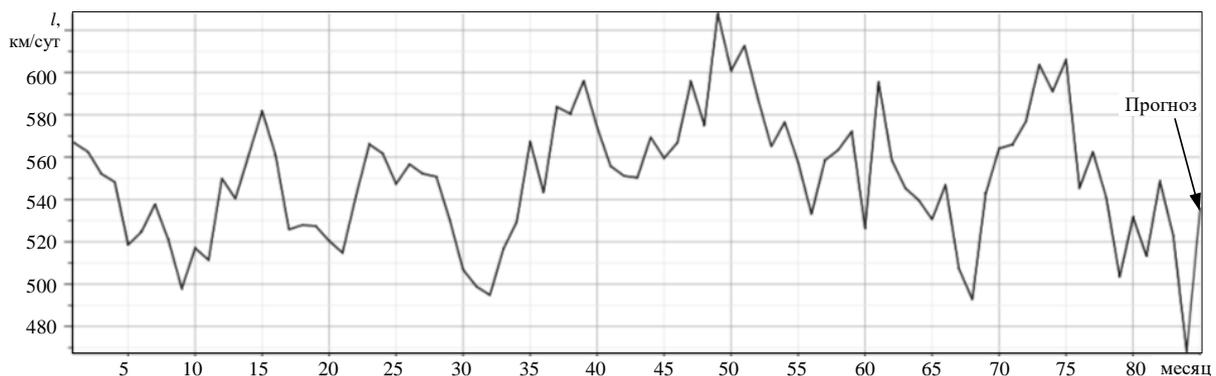


Рис. 4. Прогнозирование среднесуточного пробега в Maple

Fig. 4. Forecasting the average daily mileage in the Maple

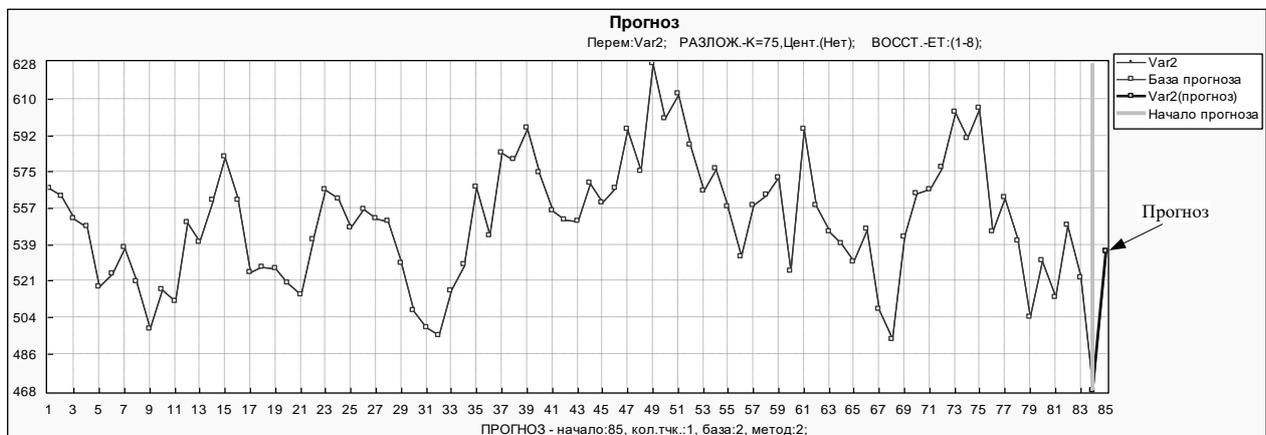


Рис. 5. Прогнозирование среднесуточного пробега в программе CaterpillarSSA

Fig. 5. Forecasting the average daily mileage in the CaterpillarSSA program

### Планирование программы ремонта локомотива

Выполнение прогноза среднесуточного пробега на длительный период позволит спланировать программу ремонта локомотивов. Для этого к прогнозируемому временному ряду целесообразно применить сплайновую (многоинтервальную) интерполяцию по следующей формуле [15, 16]:

$$f(t) = \sum_{k=0}^p a_{ik} t^k, \quad (5)$$

где  $t_{i-1} \leq t \leq t_i$ ,  $a_{ik}$  – числовой коэффициент, определяемый путем решения системы линейных уравнений;  $p$  – количество элементов в прогнозируемом ряду;  $t$  – временной параметр, в данном случае приняты сутки. В Maple пакет Statistics дает возможности реализовать интерполирование.

Интеграл функции (5) позволит определить линейный пробег локомотива:

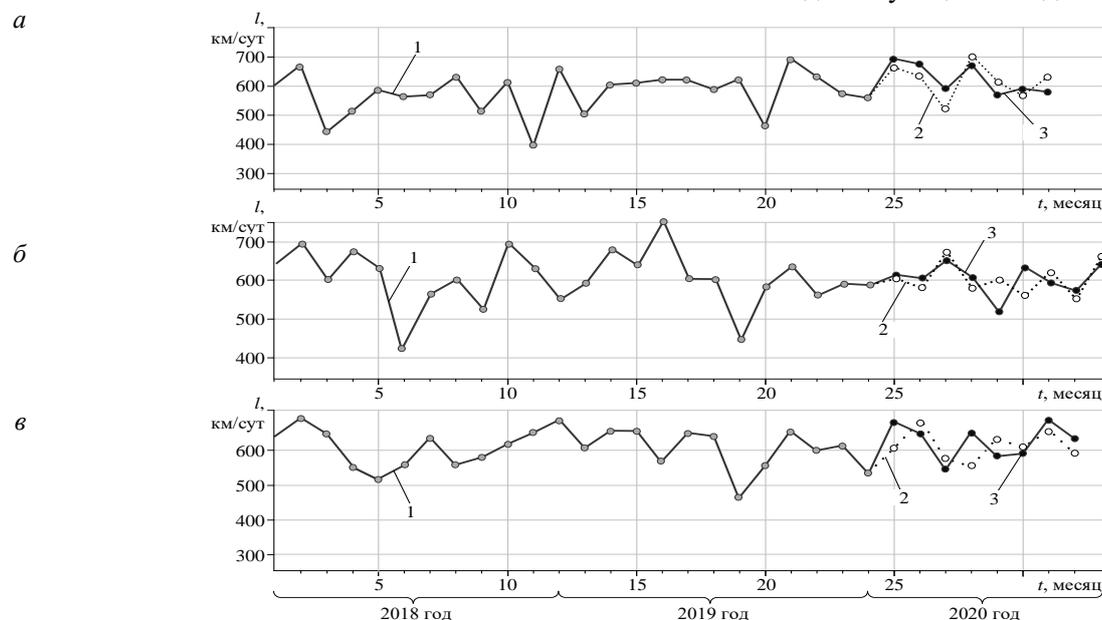
$$L_{\text{лин}}(t) = \int_{t_0}^T f(t) dt, \quad (6)$$

где  $t_0$  – начало прогнозируемого периода, сут;  $T$  – окончание прогнозируемого периода, сут. По полученной зависимости линейного пробега от пройденных суток возможно определить дату наступления искомого межремонтного пробега.

На примере локомотивного парка ЗЭС5К проведено сравнение фактических дат наступления пробега для выполнения цикловых работ в объеме СР (1 000 000 км) в 2020 году с планируемыми, рассчитанными по действующей методике (в рамках 2020 г.) и в соответствии с математической моделью [22, 23]. На рис. 6 представлены графики среднесуточного пробега трех электровозов, где исходные значения представляют собой временной ряд 1 за период с января 2018 по декабрь 2019 г. Прогнозируемая динамика 2 по своей форме схожа с фактической кривой фактических значений 3.

По выражению (6) выполнен расчет линейного пробега для группы локомотивов, определены даты. Результаты сравнения представлены в табл. 1. Среднее отклонение дат, полученных по существующей методике, 21,53 сут., а по метаматематической модели 10,88 сут.. Планирование программы ремонта в объеме СР с применением SSA-метода прогнозирования на 49,45 % эффективней.

Аналогичным образом выполнено сравнение наступления дат межремонтного пробега для выполнения цикловых работ локомотивам в объеме ТР-3 (500 000 км). На рис. 7 представлены графики среднесуточного пробега, в табл. 2 – результаты сравнения. В этом случае эффективность модели составляет 41,96 % по отношению к действующей методике.

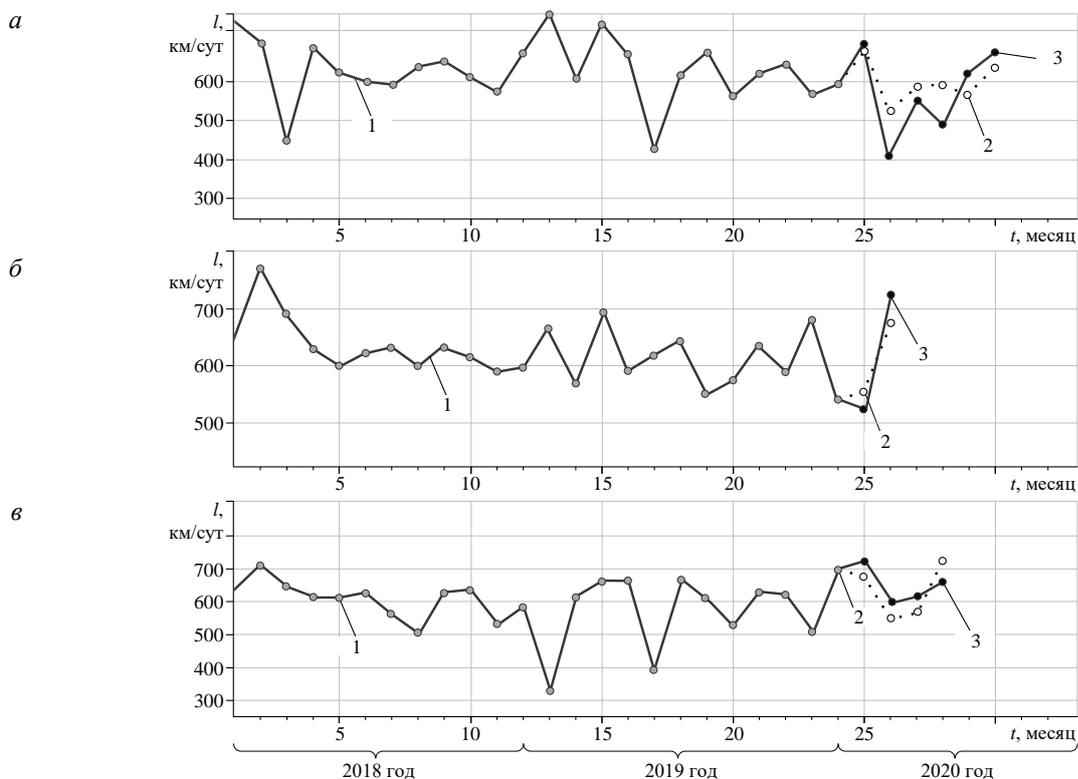


**Рис. 6.** Прогноз динамики среднесуточного пробега электровозов: а) локомотив № 102; б) локомотив № 72; в) локомотив № 110; 1 – исходные значения; 2 – прогнозируемые значения; 3 – фактические значения

**Fig. 6.** Average daily mileage dynamics forecast for electric locomotives: а) locomotive No. 102; б) locomotive No. 72; в) locomotive No. 110; 1 – initial values; 2 – predicted values; 3 – actual values

**Таблица 1.** Планирование даты наступления межремонтного пробега при среднем ремонте  
**Table 1.** Planning the onset date of the start of the interregnum run with average repair

№	Номер локомотива	Фактическая дата наступления межремонтного пробега	Планирование даты наступления межремонтного пробега			
			По действующей методике		По математической модели	
			Дата	Отклонение, сут	Дата	Отклонение, сут
1	102	19.01.2020	19.02.2020	31	31.01.2020	12
2	72	04.02.2020	20.02.2020	16	17.02.2020	13
3	110	10.02.2020	01.03.2020	20	18.02.2020	8
4	60	12.03.2020	17.04.2020	36	31.03.2020	19
5	85	21.03.2020	27.04.2020	37	31.03.2020	10
6	114	04.04.2020	09.04.2020	5	07.04.2020	3
7	143	08.05.2020	23.05.2020	15	12.05.2020	4
8	151	11.05.2020	12.06.2020	32	26.05.2020	15
9	154	21.06.2020	28.07.2020	37	03.07.2020	12
10	152	21.06.2020	02.07.2020	11	01.07.2020	10
11	144	21.06.2020	27.05.2020	25	06.06.2020	15
12	141	04.07.2020	21.07.2020	17	13.07.2020	9
13	159	05.07.2020	13.08.2020	39	31.07.2020	26
14	161	15.07.2020	02.08.2020	18	21.07.2020	6
15	165	14.08.2020	24.08.2020	10	23.08.2020	9
16	181	10.09.2020	12.09.2020	2	13.09.2020	3
17	178	23.09.2020	08.09.2020	15	12.09.2020	11
Среднее значение			–	21,53	–	10,88



**Рис. 7.** Прогноз динамики среднесуточного пробега электровозов: а) локомотив № 315; б) локомотив № 278; в) локомотив № 277; 1 – исходные значения; 2 – прогнозируемые значения; 3 – фактические значения

**Fig. 7.** Average daily mileage dynamics forecast electric locomotives: а) locomotive No. 315; б) locomotive No. 278; в) locomotive No. 278; 1 – initial values; 2 – predicted values; 3 – actual values

**Таблица 2.** Планирование даты наступления межремонтного пробега ТР-3  
**Table 2.** Planning the onset date of the interregnum run TR-3

№	Номер локомотива	Фактическая дата наступления межремонтного пробега	Планирование даты наступления межремонтного пробега			
			По действующей методике		По математической модели	
			Дата	Отклонение, сут	Дата	Отклонение, сут
1	284	12.01.2020	06.01.2020	6	19.01.2020	7
2	302	27.01.2020	10.01.2020	17	07.02.2020	11
3	294	01.02.2020	04.01.2020	27	31.01.2020	1
4	293	20.02.2020	28.02.2020	9	29.02.2020	9
5	269	21.02.2020	26.02.2020	5	01.03.2020	9
6	277	23.02.2020	21.01.2020	33	13.02.2020	9
7	291	23.02.2020	09.01.2020	44	07.02.2020	16
8	334	25.02.2020	11.02.2020	14	02.03.2020	7
9	278	20.03.2020	04.04.2020	15	23.03.2020	3
10	300	26.03.2020	07.03.2020	18	07.04.2020	13
11	296	03.05.2020	13.05.2020	11	17.05.2020	15
12	349	05.05.2020	22.05.2020	18	24.05.2020	20
13	315	08.05.2020	08.04.2020	30	18.05.2020	11
14	346	11.05.2020	22.04.2020	18	21.05.2020	10
15	350	15.05.2020	06.05.2020	8	25.05.2020	11
16	347	23.05.2020	19.06.2020	28	09.06.2020	17
17	10	29.08.2020	24.07.2020	35	23.09.2020	26
Среднее значение			–	19,76	–	11,47

### Заключение

Потребность в более точном прогнозе очевидна. Сезонность наносит ущерб деятельности компании ОАО «РЖД», изучение сезонных колебаний необходимо в целях обеспечения более ритмичной работы локомотивного комплекса, нормального функционирования производственных цехов, выполнения плана сервисными и эксплуатационными предприятиями.

Разработанная математическая модель позволяет спланировать программу ремонта для каждого локомотива с учетом влияния технико-технологических, сезонных и случайных факторов в отличии от принятой методики, где расчет даты наступления ремонта оценивается по среднему значению среднесуточного пробега в текущем году.

Ввиду эффективности использования метода SSA результаты модели позволят:

– рационально распределить ремонты, материалы, запчасти и оборудование между сервисными организациями;

– снизить расходы в следствие длительного непроизводительного простоя локомотивов в ожидании ремонта;

– спланировать эксплуатационную работу с учетом выбытия локомотивов из эксплуатируемого парка в результате ремонта и маневровую работу по подаче ремонтпригодных локомотивов в цех сервисного предприятия.

Математическая модель рассчитана на использование как при оперативном (день, декада, месяц), так и при длительном планировании (квартал, год). В условиях планово-предупредительной системы ремонта также применена к иному рельсовому или безрельсовому транспорту, для которого межремонтный период нормирован пробегом.

### Список литературы

1. Давыдов Ю.А., Мухин О.О., Заболотный В.В. Оценка влияния системных неисправностей локомотивов на среднесуточный пробег // Изв. Транс. 2021. № 3 (47). С. 31–41.
2. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» - SSA : анализ временных рядов. СПб. : Изд-во СПбГУ, 2004. 76 с.
3. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» - SSA : прогноз временных рядов. СПб. : Изд-во СПбГУ, 2004. 50 с.
4. Golyandina N., Korobeynikov A. Basic Singular Spectrum Analysis and Forecasting with R // Computational Statistics and Data Analysis. 2014. Vol. 71. P. 934–954. DOI: 10.1016/j.csda.2013.04.009.
5. The Sliding Singular Spectrum Analysis: a Data-Driven Non Stationary Signal Decomposition Tool / J. Harmouche, D. Fourer et al. // IEEE Transactions on Signal Processing. 2018. № 66(1). P. 251–263.

6. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package / N. Golyandina, A. Korobeynikov, A. Shlemov // *Journal of Statistical Software*. 2015. Vol. 67, Is. 2. P. 1–78.
7. Голяндина Н.Э., Осипов Е.В. Метод «Гусеница» -SSA для анализа временных рядов с пропусками // Гусеница : сайт. URL: <https://www.gistatgroup.com/gus/mvssa1ru.pdf> (Дата обращения: 25.12.2021).
8. Кулинич, Ю.М., Шухарев С.А. Прогнозирование стоимости электроэнергии и состояния изоляции электрооборудования // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020. № 8 (3). С. 25–26.
9. Прогнозирование временного ряда на основе метода «Гусеница» -SSA / Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, Е.А. Воробьева, и др. // XVIII Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2015) : материалы конф. СПб., 2015. Т. 1. С. 404–407.
10. Иванова К.А., Тирских В.В. Планирование объема грузоперевозок на станциях ВСЖД методом «SSA-Гусеница» // *Информатизация и виртуализация экономической и социальной жизни : материалы VII Всерос. студен. науч.-практ. конф. с междунар. участием*. Иркутск, 2019. С. 230–235.
11. Иванов В.В., Осетров Е.С. Прогнозирование суточных объемов пассажирских перевозок в Московском метрополитене // *Письма в ЭЧАЯ*. 2018. Т. 15. № 1(213). С. 88–108.
12. Трофимова В.Ш. Экономико-математическое моделирование и прогнозирование электропотребления промышленного предприятия (на примере ОАО «ММК») // *Экономика, статистика и информатика*. 2010. № 4. С. 109–114.
13. Щелкалин В.Н., Тевяшев А.Д. Трендовый и декомпозиционный подходы прогнозирования процессов потребления электроэнергии // *Вост.-Европ. журн. передовых технологий*. 2011. Т. 5. № 4(53). С. 30–37.
14. Щелкалин В.Н. Системный подход к синтезу математических моделей прогнозирования взаимосвязанных нестационарных временных рядов // *Вост.-Европ. журн. передовых технологий*. 2015. Т. 2. № 4(74). С. 21–35.
15. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. М. : ДМК Пресс, 2011. 800 с.
16. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры : [Mathcad, Maple, Mathematica, Drive, MuPAD. Аналитические и численные вычисления и их визуализация. Сотни примеров математических расчетов]. М. : ДМК Пресс, 2010. 1263 с.
17. 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). P. 2642–2653.
18. Степанов Д.В., Голяндина Н.Э. Варианты метода «Гусеница» - SSA для прогноза многомерных временных рядов // *Идентификация систем и задачи управления : тр. IV Междунар. конф. Москва, 2005*. С. 1831–1848.
19. Структурный анализ и прогноз зимних осадков методом «Caterpillar» -SSA / А.А. Ташилова, Л.А. Кешева, С.Б. Балкарова и др. // *Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук*. 2013. Т. 15. № 1. С. 106–114.
20. V. Ivanov, E. Osetrov. Application of Artificial Neural Networks and Singular-Spectral Analysis in Forecasting the Daily Traffic in the Moscow Metro // *EPJ Web of Conferences*. Dubna, 2018. P. 05009. DOI 10.1051/epjconf/201817305009.
21. Вохмянин С.В. Испытание алгоритма метода «гусеница-SSA» для восстановления временного ряда // *Вестн. Сибир. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева*. 2010. № 2(28). С. 59–62.
22. Нормы межремонтных пробегов железнодорожного подвижного состава, эксплуатируемого на инфраструктуре : распоряжение ОАО «РЖД» от 11.08.2016 г. № 1651/р. Доступ из справ.-прав. системы «Автоматизированная система правовой информации на железнодорожном транспорте» (Дата обращения: 27.12.2021).
23. Методика расчета потребности в заводских и депоовских ремонтах локомотивов ОАО «РЖД». Расчет P1881 PP : распоряжение ОАО «РЖД» от 6.02.2019 г. № 198/р. Доступ из справ.-прав. системы «Автоматизированная система правовой информации на железнодорожном транспорте» (Дата обращения: 27.12.2021).

## References

1. Davydov Yu.A., Mukhin O.O., Zabolotnyi V.V. Otsenka vliyaniya sistemnykh neispravnostei lokomotivov na srednesutochnyy probeg [Assessment of the influence of system failures of locomotives on average day run]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletin of Transsib]. 2021, no 3(47), pp. 31–41.
2. Golyandina N.E. Metod «Gusenitsa»-SSA: analiz vremennykh ryadov [Caterpillar-SSA Method: time series analysis]. Saint Petersburg: SPbGU Publ., 2004. 76 p.
3. Golyandina N.E. Metod «Gusenitsa» -SSA: prognoz vremennykh ryadov [Caterpillar-SSA Method: Time Series Forecast]. Saint Petersburg: SPbGU Publ., 2004. 50 p.
4. N. Golyandina, A. Korobeynikov Basic Singular Spectrum Analysis and Forecasting with R. *Computational Statistics and Data Analysis*. Volume 71, 2014, pp. 934–954.
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, no. 66(1), pp. 251–263.
6. N. Golyandina, A. Korobeynikov, A. Shlemov, K. Usevich. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package. *Journal of Statistical Software*, v.67, Issue 2, 2015, pp. 1–78.
7. Golyandina N.E., Osipov E.V. Metod «Gusenitsa» -SSA dlya analiza vremennykh ryadov s propuskami (Elektronnyy resurs) [Caterpillar-SSA method for time series analysis with gaps (Electronic resource)]. Available at: <https://www.gistatgroup.com/gus/mvssa1ru.pdf>. (Accessed December 25, 2021).
8. Kulnich Yu.M., Shukharev S.A. Prognozirovaniye tendentsii razvitiya energetiki zheleznodorozhnogo transporta [Forecasting the development trend of railway energy]. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology]. 2020, no 8 (3), pp. 25 – 26.
9. Polyakhov N.D., Prikhod'ko I.A., Vorobieva E.A., Minor A.S. Prognozirovaniye vremennogo ryada na osnove metoda «Gusenitsa»-SSA [Time series forecasting based on the Caterpillar-SSA method]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoi konferentsii*

po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM'2015) [Proceedings of XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2015)]. Saint Petersburg, 2015, vol. 1, pp. 404–407.

10. Ivanova K.A., Tirsikh V.V. Planirovaniye ob"ema gruzoperevozok na stantsiyakh VSZHD metodom «SSA-Gusenitsa» [Planning the volume of freight traffic at the stations of the Higher Railways using the SSA-Caterpillar method]. *Materialy VII Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Informatizatsiya i virtualizatsiya ekonomicheskoy i sotsial'noy zhizni»* [Proceedings of the VII All-Russian Student Scientific and Practical Conference with international participation «Informatization and virtualization of economic and social life»]. Irkutsk, 2019, pp. 230–235.

11. Ivanov V.V., Osetrov E.S. Prognozirovaniye sutochnykh ob'yemov passazhirskikh perevozok v Moskovskom metropolitene [Forecasting daily volumes of passenger traffic in the Moscow Metro]. *Pis'ma v zhurnal Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra* [Letters to the journal Physics of elementary particles and the atomic nucleus]. 2018, vol. 15, no 1 (213), pp. 88–108.

12. Trofimova V.Sh. Ekonomiko-matematicheskoye modelirovaniye i prognozirovaniye elektropotrebleniya promyshlennogo predpriyatiya (na primere OAO «MMK») [Economic and mathematical modeling and forecasting of energy consumption of an industrial enterprise (on the example of OJSC MMK)]. *Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO* [Economics, statistics and computer science. Bulletin of UMO]. 2010, no. 4, pp. 109–114.

13. Shchelkalin V.N., Tevyashev A.D. Trendovyi i dekompozitsionnyi podkhody prognozirovaniya protsessov potrebleniya elektroenergii [Trend and decomposition approaches to forecasting processes of electricity consumption]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii* [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 2011, no 4 (53), pp. 30–37.

14. Shchelkalin V.N. Sistemnyi podkhod k sintezu matematicheskikh modelei prognozirovaniya vzaimosvyazannykh nestatsionarnykh vremennykh ryadov [A systematic approach to the synthesis of mathematical forecasting models of interconnected non-stationary time series]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii* [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 2015, no 4 (74), pp. 21–35.

15. D'yakonov V.P. Maple 10/11/12/13/14 v matematicheskikh raschetakh [Maple 10/11/12/13/14 in mathematical calculations]. Moscow: DMK Press Publ., 2011. 800 p.

16. D'yakonov V.P. Entsiklopediya komp'yuternoï algebrы. Mathcad, Maple, Mathematica, Drive, MuPAD. Analiticheskiye i chislennyye vychisleniya i ikh vizualizatsiya. Sotni primerov matematicheskikh raschetov [Encyclopedia of Computer Algebra. Mathcad, Maple, Mathematica, Drive, MuPAD. Analytical and numerical calculations and their visualization. Hundreds of examples of mathematical calculations]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 1268 p.

17. N. Golyandina, E. Osipov. The «Caterpillar»-SSA method for analysis of time series with missing values. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2007, no. 137(8), pp. 2642–2653.

18. Stepanov D.V., Golyandina N.E. Varianty metoda «Gusenitsa»-SSA dlya prognoza mnogomernykh vremennykh ryadov [Variants of the Caterpillar-SSA method for forecasting multivariate time series]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy konferentsii «Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya»* [Proceedings of the IV International Conference «Identification of Systems and Control Problems»]. Moscow, 2005, pp. 1831–1848.

19. Tashilova A.A., Kesheva L.A., Balkarova S.B. etc. Strukturnyi analiz i prognoz zimnikh osadkov metodom «Caterpillar»-SSA [Structural analysis and forecast of winter precipitation using the Caterpillar-SSA method]. *Doklady Adygskoi (Cherkesskoi) Mezhdunarodnoi akademii nauk* [Reports of the Adyghe (Cherkess) International Academy of Sciences]. 2013, no 1, pp. 106–114.

20. V. Ivanov, E. Osetrov. Application of Artificial Neural Networks and Singular-Spectral Analysis in Forecasting the Daily Traffic in the Moscow Metro // EPJ Web of Conferences. Dubna, 2018. P. 05009. DOI 10.1051/epjconf/201817305009.

21. Vokhmyanin S.V. Ispytaniye algoritma metoda «Gusenitsa-SSA» dlya vosstanovleniya vremennogo ryada [Testing the algorithm of the «Caterpillar-SSA» method for restoring the time series]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aehrokozmoshcheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev]. 2010, no 2 (28), pp. 59–62.

22. Rasporyazheniye OAO «RZHD» ot 11.08.2016 no. 1651r «Normy mezhremontnykh probegov zheleznodorozhnogo podvuzhnogo sostava, ekspluatiruyemogo na infrastrukture» [Order of JSC «Russian Railways» dated August 11, 2016, no 1651r «Standards of overhaul runs of railway rolling stock operated on the infrastructure»]. Available at: «Automated system of legal information on railway transport» (Accessed December 27, 2021).

23. Rasporyazheniye OAO «RZHD» ot 6 fevralya 2019, no 198r «Metodika rascheta potrebnosti v zavodskikh i depovskikh remontakh lokomotivov OAO «RZHD». Raschet R1881 RR» [Order of JSC «Russian Railways» dated 6.02.2019, no 198r «Methodology for calculating the need for factory and depot repairs of locomotives of JSC «Russian Railways». Calculation of R1881 RR»]. Available at: «Automated system of legal information on railway transport» (Accessed December 27, 2021).

### Информация об авторах

**Мухин Олег Олегович**, аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: muhinoo@mail.ru

### Information about the authors

**Oleg O. Mukhin**, Ph.D. student of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: muhinoo@mail.ru