

УДК 629.488:629.423.1

## Прогнозирование динамики пробега локомотивов с учетом влияния неисправностей и модернизаций узлов

О. О. Мухин

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47

**Для цитирования:** Мухин О. О. Прогнозирование динамики пробега локомотивов с учетом влияния неисправностей и модернизаций узлов / О. О. Мухин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 4. — С. 90–105. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-90-105

### Аннотация

**Цель:** Совершенствование системы планирования деповских, заводских ремонтов и модернизаций локомотивов в условиях поставки нового подвижного состава на основе контракта жизненного цикла путем разработки и применения математической модели прогнозирования среднесуточного и линейного пробега с учетом влияния на пробег технико-технологических, сезонных и случайных факторов, а также неисправностей лимитирующих узлов и их модернизаций. **Методы:** Для реализации поставленной цели проведена оценка влияния непроизводительного простоя новых локомотивов на ремонтах в результате устранения неисправностей узлов и оборудования и простоя в ожидании плановых ремонтов на динамику среднесуточного и линейного пробега. На базе метода многомерного спектрального сингулярного анализа и прогнозирования временных рядов *Multi-Channel Singular Spectrum Analysis* разработана математическая модель прогнозирования пробега, алгоритм которой реализован в интегрированной среде программирования *Visual Studio* (2019) на языке Си плюс-плюс. **Результаты:** Предложен метод определения пробега на основе данных прогноза с учетом возможных неисправностей узлов и оборудования и планируемых модернизаций. **Практическая значимость:** В условиях применения контракта жизненного цикла, в рамках которого подразумевается участие заводов-изготовителей локомотивов и их комплектующих в технической поддержке поставляемой продукции на всем ее сроке службы, использование предложенной модели при ежемесячном, ежеквартальном и ежегодном планировании программы ремонта позволит снизить время простоя в ожидании постановки на ремонтную позицию за счет более точного прогноза, рационально распределить ремонты, материалы, фонд линейного оборудования между сервисными предприятиями.

**Ключевые слова:** Тяговый подвижной состав, электровоз, планово-предупредительная система ремонта, ремонт локомотивов, планирование ремонтов, прогнозирование временных рядов, среднесуточный пробег, модернизация узлов.

## **Введение**

Одним из направлений стратегии развития транспорта Российской Федерации является приобретение железнодорожной продукции на основе контракта жизненного цикла (КЖЦ). В локомотивном комплексе мероприятие реализовано в 2018 г. путем заключения договора между ОАО «РЖД» и АО «ТМХ-Локомотив». Организация деятельности в рамках КЖЦ имеет ряд трудностей, как пример: сложность в планировании работ по поддержке жизненного цикла (ЖЦ) и в расчете стоимости ЖЦ; недостаточный опыт управления подобными проектами в железнодорожной отрасли страны. В настоящее время применяемая на сети железных дорог методика планирования потребности локомотивов в ремонтах, стоимости сервисного обслуживания не позволяет учесть технико-технологические, сезонные, случайные и административные факторы, влияющие на среднесуточный пробег — искомая дата наступления ремонта определяется по значению среднего в текущем году среднесуточного пробега для каждого локомотива в парке. В условиях новой концепции поставки железнодорожной продукции на основе КЖЦ, стремительного развития инфраструктуры и локомотивного комплекса направление планирования программы ремонта подвижного состава до настоящего времени остается не до конца исследовано. Стратегией развития транспортного машиностроения на период до 2030 г. также отмечена необходимость в переходе к новой системе планирования [1–3].

Несмотря на массовое обновление локомотивного парка железных дорог России, при достаточной мощности сервисных предприятий сохранился длительный простой в ожидании ремонта, что приводит к непроизводительным потерям. Данный факт возможен по причине снижения точности планирования программы ремонта, вызванной негативным влиянием случайных и сезонных факторов на динамику пробега. Ввиду чего появляется необходимость в актуализации существующей методики планирования путем применения наиболее точного метода прогнозирования, который позволит учесть влияние различных факторов, в том числе отказов в работе технических средств и модернизаций, на результаты прогноза [1–3].

## **Исследование влияния непроизводительного простоя на динамику пробега**

Непроизводительный простой локомотивного парка влияет на снижение пробега и, как следствие, на возникновение случайных колебаний в динамике, что, в свою очередь, препятствует прогнозированию затрат на всем ЖЦ, снижает качество планирования программы ремонта. В целях оценки его влияния необходимо учесть потерянное время в результате нахождения локомотивов в состоянии ожидания ремонта, время на проведение сверхцикловых работ на плановых ремонтах, связанных с устранением неисправностей, на проведение неплановых ремонтов,

а также продолжительность задержки поезда по причине отказа технических средств [1].

Для расчета потерь линейного пробега в исследуемом периоде в отношении всего приписного парка локомотивов одной серии предлагается следующее выражение:

$$-PL_i = \sum_{i=1}^t \tau_i V, \quad (1)$$

где  $\tau_i$  — время непроизводительного простоя в  $i$  месяце, час;

$V$  — среднесуточная скорость движения локомотива, км/ч, определяется как отношение максимального или минимального значения среднесуточного пробега  $l$  в исследуемом периоде и количества часов в сутках  $l / 24$ ;

$t$  — количество месяцев в исследуемом периоде. Потери среднесуточного пробега можно определить как:

$$-Pl_i = \sum_{i=1}^t \frac{\tau_i V}{d_i n_i}, \quad (2)$$

где  $d_i$  — количество календарных дней в  $i$  месяце, сут;

$n_i$  — количество локомотивов в парке.

Исследование проведено на примере динамики пробега и непроизводительного простоя новых электровозов серии ЗЭС5К (начиная с 1000 номера), поставляемых в рамках КЖЦ, за период с момента их запуска в эксплуатацию, после поставки в депо (март 2020 г.), до конца 2021 г. По данным АРМ ОНД (автоматизированное рабочее место по отчетности, формируемой в АСОУП-2), максимальное значение среднесуточного пробега рабочего парка локомотивов за период составило 648,453 км/сут, а минимальное — 388,401 км/сут. Тогда появляется возможность произвести расчет максимальной и минимальной среднесуточной скорости:

$$V_{\max} = 644,293 / 24 = 26,846 \text{ км/ч}, \quad V_{\min} = 388,401 / 24 = 16,183 \text{ км/ч}.$$

То есть возможная среднесуточная скорость в исследуемом периоде, которую мог бы реализовать локомотивный парк в эксплуатации, с учетом всех видов технико-технологических операций с локомотивами, находится в интервале от 16,183 до 26,846 км/ч.

По значениям скоростей  $V_{\max}$ ,  $V_{\min}$  произведен расчет потерь среднесуточного и линейного пробега по формулам (1), (2). За период эксплуатации общие потери в результате выполнения неплановых ремонтов  $-PL_{\max}(V_{\max})$  составили 451 955 км,  $-PL_{\min}(V_{\min})$  — 272 454 км. Потери в результате простоя в ожидании планового ремонта  $-PL_{\max}(V_{\max})$  — 558 651 км,  $-PL_{\min}(V_{\min})$  — 336 774 км. Недополученную сервисной компанией прибыль от простоя ( $SP$ ) возможно определить

путем умножения общих потерь  $-PL_{\max}$  или  $-PL_{\min}$  на стоимость одного километра пробега  $S_{\text{км}}$ , для трехсекционного локомотива ( $n_{\text{сек}} = 3$ ) 16,22 руб/км, по следующему выражению:

$$-SP = S_{\text{км}} \cdot n_{\text{сек}} \cdot PL. \quad (3)$$

Тогда в результате простоя парка локомотивов в ожидании планового ремонта и на неплановых ремонтах недополученная прибыль в соответствии с выражением (3) может составить от  $-SP_{\min} = 29\,645\,004$  руб. до  $-SP_{\max} = 49\,176\,110$  руб. Произведенный расчет указывает на значительные потери сервисной компании. На рис. 1 представлен график потерь линейного пробега и возможной недополученной прибыли за 22 месяца эксплуатации новых электровозов. Линии  $-PL_{\max} / -SP_{\max}$  и  $-PL_{\min} / -SP_{\min}$  образуют между собой интервал, который характеризует разброс потерь пробега в результате простоя. Имея представление о потерях, появляется возможность оценить их влияние на динамику пробега (рис. 1).

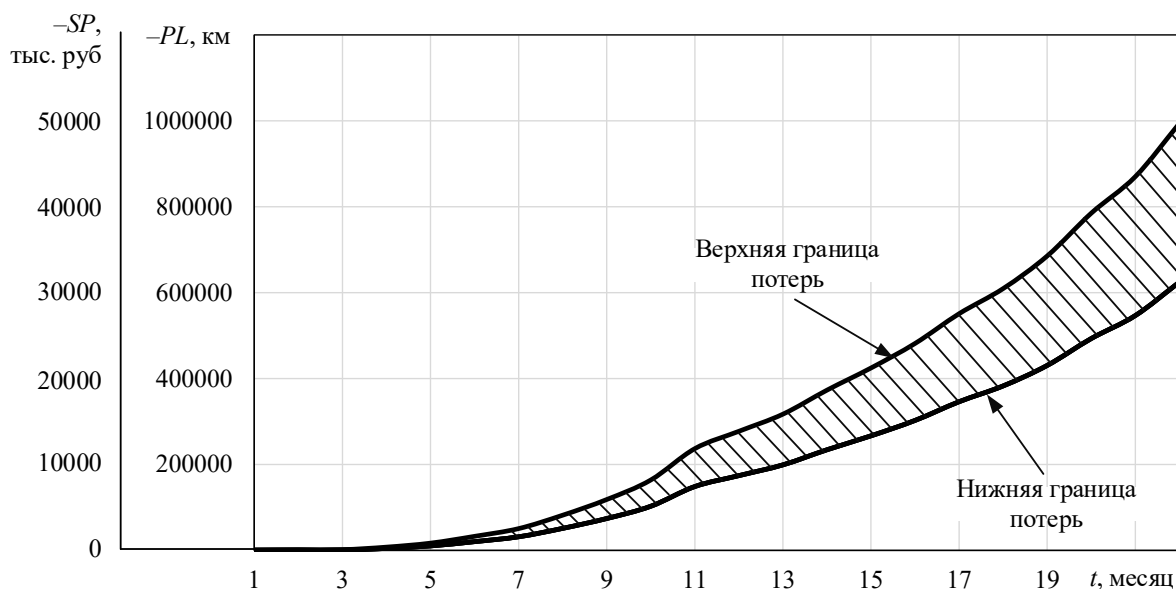


Рис. 1. График потерь пробега в результате непроизводительного простоя

На рис. 2, а представлен график среднесуточного пробега. Результаты расчета потерь от непроизводительного простоя изображены в виде диаграмм, рис. 2, б, в. Кривая 1 (см. рис. 2, а) характеризует исходные данные о среднесуточном пробеге  $l$ , кривая 2 — пробег без учета потерь от простоя, определенный как разница между  $l$  и  $PL$ . Коэффициент корреляции между исходными данными о пробеге и простоем на неплановом ремонте составляет  $-0,466$ , а между пробегом и простоем в ожидании ремонта —  $0,511$ , что говорит о заметном взаимовлиянии. Корреляция между динамикой пробега с учетом непроизводительного простоя (кривая 1) и без него (кривая 2) составляет  $0,999$ .

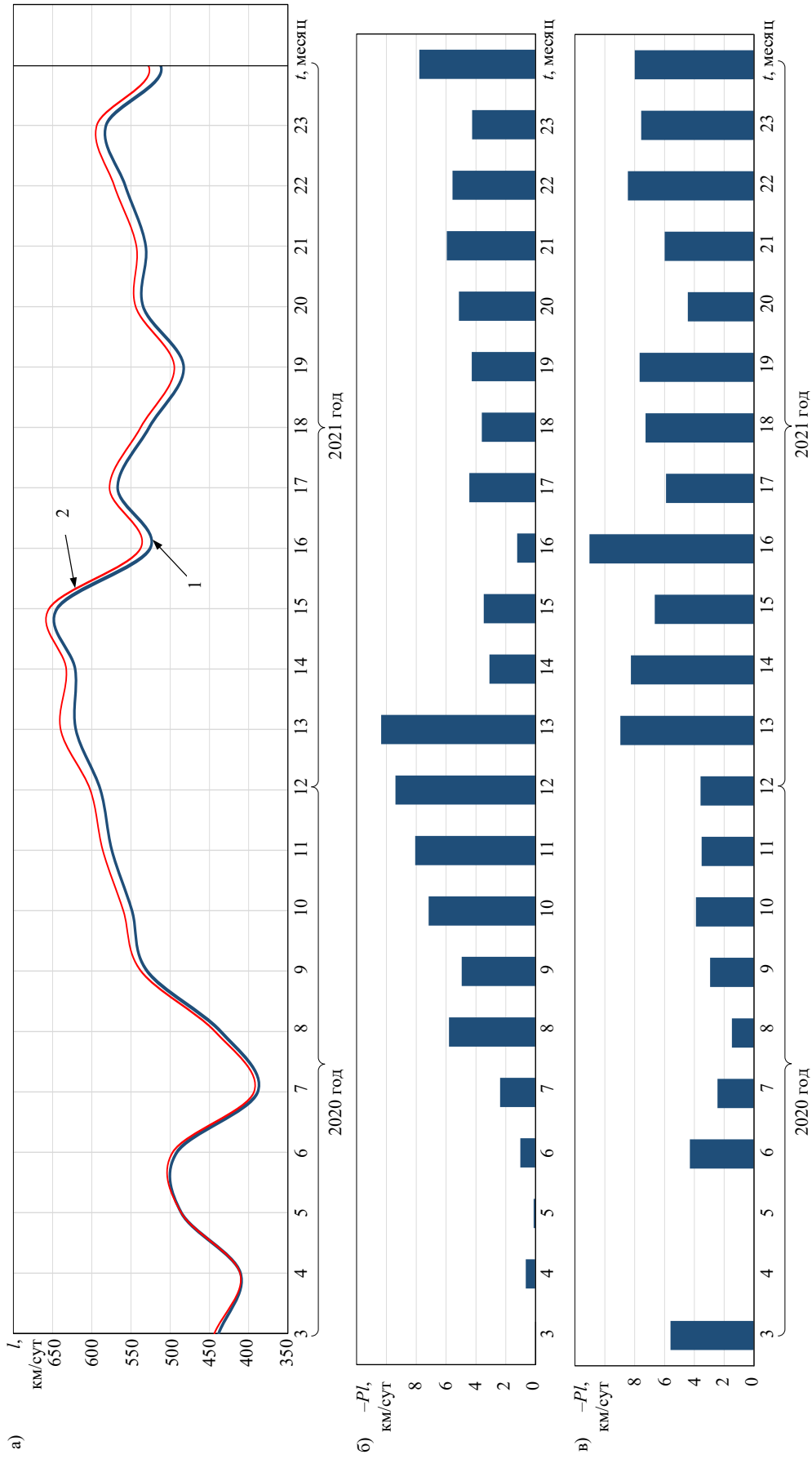


Рис. 2. Анализ влияния unplanned downtime на динамику среднесуточного пробега:

$a$  — график среднесуточного пробега;

$l$  — исходные значения;  $2$  — значения без потерь;  $b$  — потери пробега в результате unplanned downtime;

$c$  — потери пробега в результате простоя в ожидании ремонта

По итогам анализа двух рассматриваемых факторов возможные потери линейного пробега находятся в интервале от  $-775\,539$  до  $-1\,010\,606$  км. Известно, что пробег за период эксплуатации новых электровозов достиг  $46\,369\,951$  км, тогда появляется возможность определить процент влияния двух факторов на общий пробег, который составит от  $1,31\%$  до  $2,18\%$ . Наибольшее влияние оказывает административный простой —  $55,28\%$  от общих потерь пробега. Влияние на пробег неплановых ремонтов —  $44,72\%$ .

Таким образом, по выражениям (1)–(3) возможно определить финансовые потери и «недопробег», оценить степень влияния различных факторов, в том числе не рассмотренных в данном примере, на динамику пробега путем их ранжирования по причинам простоя.

### Математическая модель прогнозирования пробега

Для прогнозирования динамики пробега с учетом влияния различных факторов применен многомерный сингулярный спектральный анализ *Multi-Channel Singular Spectrum Analysis* (далее — *MSSA*), результатом которого является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды, сезонные и другие периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты. В отличие от одномерного метода, *MSSA* позволяет представить одновременное разложение сразу нескольких временных рядов со схожей структурой, в явном виде учесть факторы, влияющие на процесс, получить дополнительную информацию о характере воздействия, построить более точное разложение динамики пробега на компоненты [4–6].

*MSSA*-метод предполагает выполнение этапов разложения и восстановления. На первом шаге выполняется преобразование двух рядов среднесуточного пробега с учетом потерь  $l_i^{(1)}$  и без учета  $l_i^{(2)}$  с одинаковой протяженностью  $N$  в последовательность  $K = N - W + 1$  векторов-столбцов вложения протяженностью  $W$ .  $W$  — длина окна, принимается в диапазоне от 2 до  $N/2 - 1$ . В результате образуется траекторная матрица размером  $W \times 2K$ , которая имеет следующий вид:

$$\mathbf{M} = [l_1^{(1)} \dots l_K^{(1)}, l_1^{(2)} \dots l_K^{(2)}] = [\mathbf{M}^{(1)}, \mathbf{M}^{(2)}] \quad (4)$$

или может быть представлена как:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} l_1^{(1)} & l_2^{(1)} & \dots & l_K^{(1)} & l_1^{(2)} & l_2^{(2)} & \dots & l_K^{(2)} \\ l_2^{(1)} & l_3^{(1)} & \dots & l_{K+1}^{(1)} & l_2^{(2)} & l_3^{(2)} & \dots & l_{K+1}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_W^{(1)} & l_{W+1}^{(1)} & \dots & l_N^{(1)} & l_W^{(2)} & l_{W+1}^{(2)} & \dots & l_N^{(2)} \end{pmatrix},$$

где  $l_i^{(1)}$  — значение среднесуточного пробега с учетом потерь в  $i$  месяце, км/сут;  
 $l_i^{(2)}$  — пробег без потерь в  $i$  месяце, км/сут;

$\mathbf{M}^{(1)}$ ,  $\mathbf{M}^{(2)}$  — траекторные матрицы рядов  $l_i^{(1)}$  и  $l_i^{(2)}$ . Иначе, матрица  $\mathbf{M}$  представляет собой последовательность матриц  $\mathbf{M}^{(1)}$  и  $\mathbf{M}^{(2)}$  одномерных рядов, полученных при одинаковой длине окна  $W$  [4–6].

Далее выполняется процедура *SVD*-разложения (*Singular Value Decomposition*) матрицы  $\mathbf{M}$  следующим образом:

$$\mathbf{M}\mathbf{M}^T = \mathbf{M}^{(1)}\mathbf{M}^{(1)T} + \mathbf{M}^{(2)}\mathbf{M}^{(2)T} \quad (5)$$

или

$$\mathbf{M} = \sum_{k=1}^d \sigma_k u_k v_k^T = \sum_{k=1}^d \left[ u_k u_k^T \mathbf{M}^{(1)} : u_k u_k^T \mathbf{M}^{(2)} \right],$$

где  $d$  — количество доступных компонент, максимальное значение соответствует  $K$ ;  
 $k$  — порядковый номер компоненты;

$u_k, v_k$  — левые и правые сингулярные векторы ортогональных матриц  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{V}$ ;  
 $\sigma_k$  — сингулярные числа диагональной матрицы  $\mathbf{\Sigma}$ . Правый сингулярный вектор определяется как:

$$v_k = \frac{1}{\sigma_k} \begin{pmatrix} \mathbf{M}^{(1)T} u_k \\ \mathbf{M}^{(2)T} u_k \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Результатом *SVD*-разложения являются матрицы  $\mathbf{V}^T$  размером  $2K \times 2K$ ,  $\mathbf{U}$  размером  $W \times K$  и  $\mathbf{\Sigma}$   $1 \times W$ . Таким образом, *SVD*-разложение матрицы пробега  $\mathbf{M}$  можно представить в виде суммы компонент  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 + \dots + \mathbf{M}_k$ , где  $\mathbf{M}_k = \sigma_k u_k v_k^T$ . После производится группировка набора из  $d$  матриц  $\mathbf{M}_k$  (компонент) в  $r$  непересекающихся групп следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{M}}^{(j)} = \sum_{k=1}^r \mathbf{M}_{Ik}^{(j)}, \quad (7)$$

где  $j$  — номер ряда пробега;  $\mathbf{M}_{Ik}$  — результирующая матрица группы компонент, имеет размерность  $W \times 2 \times 2K$ . Каждая матрица разделяется на последовательно расположенные матрицы размером  $W \times K$ , т. е.  $\mathbf{M}_{Ik} = \left[ \mathbf{M}_{Ik}^{(1)} : \mathbf{M}_{Ik}^{(2)} \right]$  или  $\mathbf{M} = \left[ \mathbf{M}^{(1)} : \mathbf{M}^{(2)} \right]$ .

На следующем шаге для значений каждой матрицы  $\mathbf{M}^{(1)}$   $\mathbf{M}^{(2)}$  производится диагональное усреднение путем преобразования в новые временные ряды той же длины  $N$  по следующему выражению:

$$l_n^{m(j)} = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \tilde{l}_{m, n-m+1}^{(j)} & \text{при } 1 \leq n < K \\ \frac{1}{W} \sum_{m=1}^W \tilde{l}_{m, n-m+1}^{(j)} & \text{при } W \leq n < K \\ \frac{1}{N-n+1} \sum_{m=n-K+1}^n \tilde{l}_{m, n-m+1}^{(j)} & \text{при } K+1 \leq n < N, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\tilde{l}_{m, n-m+1}^{(j)}$  — элемент матрицы  $\tilde{\mathbf{M}}^{(j)}$  в соответствующей строке  $m$  и столбце  $n$ . Другими словами, процедура приводит к получению серии значений  $l_n^{m(j)}$  среднесуточного пробега [7–14].

Прогнозирование среднесуточного пробега на  $p$  точек вперед производится в соответствии с линейной рекуррентной формулой (ЛРФ) для каждого восстановленного ряда:

$$l_{N+p}^{(j)} = \sum_{k=1}^{W-1} a_k^{(j)} l_{N+1-k}^{(j)},$$

где  $a_k^{(j)}$  — коэффициент ЛРФ;

$l_{N+1-k}^{(j)}$  — восстановленные значения пробега.

Матрица  $\mathbf{U}$  ортонормированных собственных векторов ковариационной матрицы  $\mathbf{M}^{(j)}\mathbf{M}^{(j)T}$  можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{U}^{(j)} = \begin{pmatrix} u_1^{(j)} & u_1^{(j)} & \cdots & u_1^{(j)} \\ u_2^{(j)} & u_2^{(j)} & \cdots & u_2^{(j)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u_{W-1}^{(j)} & u_{W-1}^{(j)} & \cdots & u_{W-1}^{(j)} \\ u_W^{(j)} & u_W^{(j)} & \cdots & u_W^{(j)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{W-1}^{(j)} \\ u_1^{(j)} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{U}_{W-1}^{(j)}$  — матрица размером  $(W-1) \times r$ , полученная из первых  $W-1$  строк матрицы  $\mathbf{U}$ ;

$u_1^{(j)}$  — вектор-строка длиной  $r$ , является последней строкой матрицы  $\mathbf{U}$  [7–14].

Коэффициенты ЛРФ определяются по следующему выражению:

$$\left( a_{W-1}^{(j)}, \dots, a_1^{(j)} \right)^T = \frac{1}{1 - \nu^{(j)2}} \left[ \mathbf{U}_{W-1}^{(j)} \cdot \left( u_1^{(j)} \right)^T \right], \quad (10)$$

где  $\nu^{(j)}$  — коэффициент вертикальности пространства, рассчитывается по значениям нижней строки матрицы  $\mathbf{U}$  как:



$$v^{(j)2} = (u_W^{(j)})^2 + \dots + (u_W^{(j)})^2. \quad (11)$$

Подробнее с алгоритмом *MSSA* можно ознакомиться в работах [4–6]. Представленный алгоритм разработан в интегрированной среде программирования *Visual Studio* (2019) на языке Си плюс-плюс.

Протяженность исследуемых временных рядов  $N = 22$  месяца, длина окна  $W$  принимается равной 10, тогда  $K = 22 - 10 + 1 = 13$ . Таким образом, получается траекторная матрица (4) размером  $10 \times 26$ . По итогам операции *SVD*-разложения  $\mathbf{M}$  раскладывается на матрицы  $\mathbf{V}^T$  размером  $26 \times 26$ ,  $\mathbf{U}$  —  $10 \times 13$  и  $\mathbf{\Sigma}$  —  $1 \times 10$ .

Произведен прогноз на  $p = 5$  точек вперед для двух временных рядов, с учетом потерь  $l_{N+p}^{(1)}$  и без учета  $l_{N+p}^{(2)}$ , на рис. 3 и в табл. представлены результаты прогнозирования. Фактические потери находятся в интервале между кривыми 1 и 3, прогнозируемые — между кривыми 2 и 4. Совпадение прогноза с фактом с учетом потерь составляет 98,6 %, без учета 98,2 %, совпадение прогноза потерь с фактическими значениями — 77,6 %, что указывает на удовлетворительную точность математической модели.

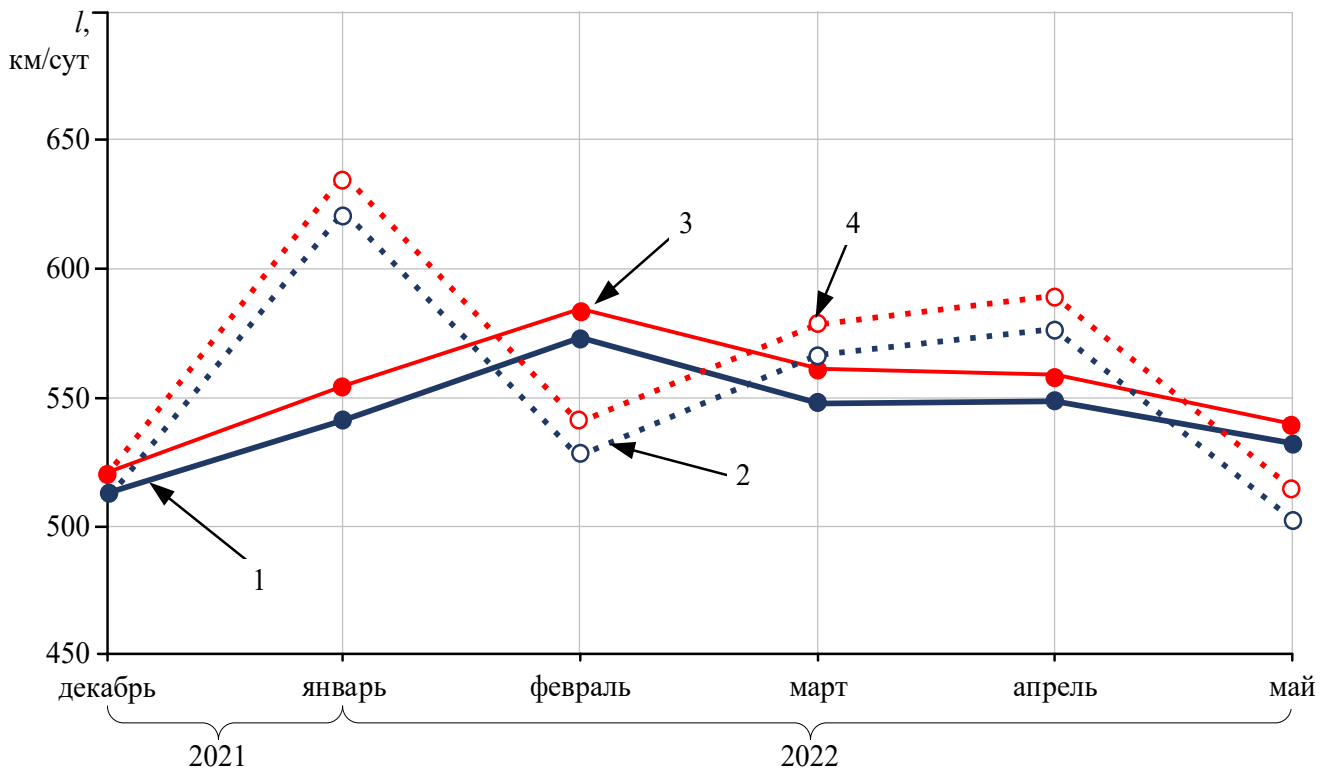


Рис. 3. График среднесуточного пробега:  
 1, 2 — фактические и прогнозируемые значения с учетом потерь;  
 3, 4 — фактические и прогнозируемые значения без потерь

### Результаты прогнозирования двумерного ряда

№	Месяц	Парк лок-в, ед.	Простой, ч	Фактические значения пробега, км/сут			Прогнозируемые значения пробега, км/сут		
				с потерями	без потерь	потери $-Pl_{max}$	С потерями	Без потерь	Потери $-Pl_{max}$
1	Январь	263	6383,3	541,587	553,863	12,276	622,451	635,619	13,168
2	Февраль	263	4522,9	573,449	583,105	9,656	527,015	539,446	12,431
3	Март	273	6621,7	548,043	560,414	12,371	564,806	577,067	12,261
4	Апрель	291	5756,9	548,890	558,129	9,239	576,528	586,468	9,940
5	Май	303	5132,4	532,351	539,517	7,166	492,244	506,492	14,248
Точность прогноза $100 - ((\Sigma \text{факт} - \text{прогноз}  / \Sigma\text{факт}) \times 100)$ , %							98,6	98,2	77,6

На рис. 4 представлены диаграммы линейного пробега локомотивов за 5 месяцев 2022 г. Фактический пробег новых электровозов по итогам эксплуатации составил 23 068 707 км при прогнозе 23 392 472 км, а факт «недопробега» — 423 849 км при прогнозе 523 273 км.

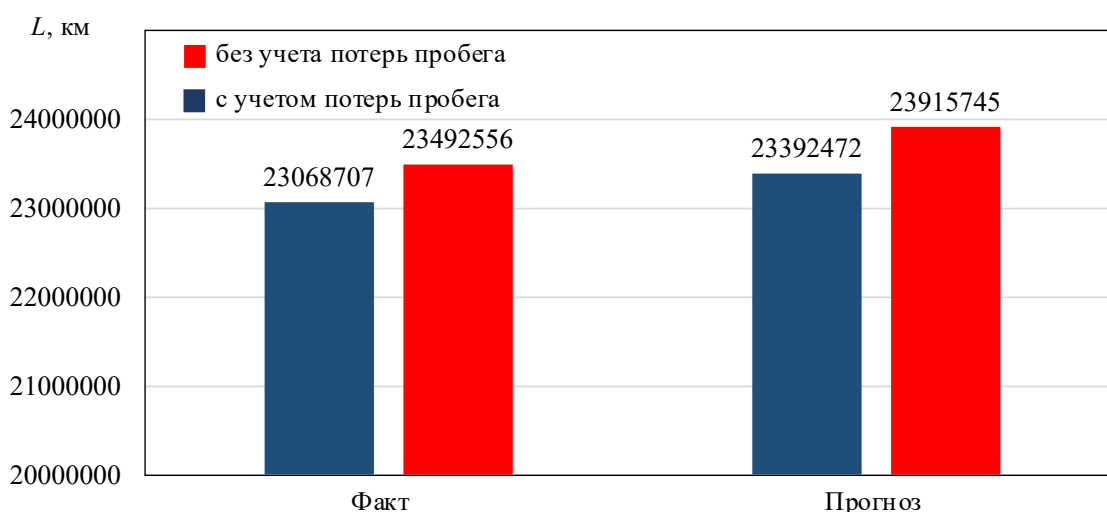


Рис. 4. Диаграмма линейного пробега с учетом простоя и без

В условиях существования КЖЦ, где подразумевается участие заводов-изготовителей в технической поддержке поставляемой продукции на всем ЖЦ (проведение модернизаций лимитирующих узлов), имея представление о грядущих модернизациях и имея в распоряжении временной ряд без учета потерь в результате неисправностей лимитирующих узлов, появляется возможность выполнить прогнозирование с еще большей точностью.

Безусловно, невозможно добиться полного совпадения прогноза с фактом, однако разработанная модель на базе *MSSA*-метода позволит получить математически обоснованный прогноз с учетом потерь пробега локомотивов в результате простоя на ремонтах.

Оценка эффективности модернизации в настоящее время проводится путем сравнения количества случаев отказов до и после внедрения технического решения. Дополнительно предлагается проводить оценку путем сравнения «недопробега»  $-PL$  и  $-Pl$  с фактическим значением после модернизаций.

### Прогнозирование динамики пробега с учетом модернизаций

В КЖЦ важную роль играет модернизация узлов, по которым были допущены неисправности как по ответственности сервисной компании, так и по ответственности заводов-изготовителей. Помимо плановой замены крупногабаритного оборудования на усовершенствованное или установки ранее не используемого при проведении заводских ремонтов большая доля модернизаций приходится на устранение скрытых дефектов уже эксплуатируемых узлов на текущих ремонтах в условиях линейных предприятий.

С каждой модернизацией степень влияния неисправностей на пробег снижается. Для того чтобы учесть это снижение в рамках прогноза, введен коэффициент выполняемости модернизаций, который рассчитывается следующим образом:

$$k_{M_i} = \frac{m_i}{n}, \quad (12)$$

где  $m_i$  — количество оставшихся локомотивов, подлежащих модернизации в  $i$  месяце, определяется путем планирования выполнения модернизаций на каждый месяц;

$n$  — общее количество локомотивов, подлежащих модернизации.

Тогда прогнозируемое значение среднесуточного пробега в  $i$  месяце можно определить как:

$$l_i = \left( (L_i^{(2)} - L_i^{(1)}) \cdot \frac{m_i}{n} \right) + L_i^{(1)} = PL_i k_{M_i} + L_i^{(1)}, \quad (13)$$

а линейный пробег как:

$$L_i = \left( (L_i^{(2)} - L_i^{(1)}) \cdot \frac{m_i}{n} \right) + L_i^{(1)} = PL_i k_{M_i} + L_i^{(1)}, \quad (14)$$

т. е. прогноз определяется как сумма прогнозируемых значений пробега и потерь с учетом планируемых модернизаций ( $k_M$ ) в исследуемом периоде.

Таким образом, математическая модель прогнозирования среднесуточного пробега с учетом влияния неисправностей узлов и их модернизаций в условиях КЖЦ состоит из трех этапов:

- определение потерь пробега в результате непроизводительного простоя за прошедший период в соответствии с выражениями (1)–(3);
- прогнозирование пробега методом *MSSA* по двум динамикам без учета потерь  $L_i^{(1)}$ ,  $l_i^{(1)}$  и с их учетом  $L_i^{(2)}$ ,  $l_i^{(2)}$ ;
- определение прогнозируемого значения пробега с учетом коэффициента выполнения модернизаций  $k_{Mi}$ .

## Заключение

Предложенный метод позволит при планировании программы ремонта локомотивов с большей точностью спрогнозировать дату наступления потребности в ремонте с учетом влияния неисправностей и модернизаций узлов в условиях КЖЦ.

Результаты прогнозирования предоставляют возможность: рационально распределить ремонты, материалы, запчасти и оборудование между сервисными организациями; снизить расходы вследствие простоя локомотивов в ожидании ремонта; спланировать эксплуатационную работу с учетом выбытия локомотивов из эксплуатируемого парка и маневровую работу по подаче локомотивов в цех. Кроме того, метод на основе разработанной математической модели может быть применен к любому рельсовому или безрельсовому транспорту, для которого межремонтный период нормирован пробегом.

## Библиографический список

1. Давыдов Ю. А. Оценка влияния системных неисправностей локомотивов на среднесуточный пробег / Ю. А. Давыдов, О. О. Мухин, В. В. Заболотный // Известия Транссиба. — 2021. — № 3(47). — С. 31–41.
2. Мухин О. О. Математическая модель прогнозирования среднесуточного пробега локомотивов / О. О. Мухин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2022. — № 1(73). — С. 123–132.
3. Давыдов Ю. А. Совершенствование системы поддержки жизненного цикла локомотивов / О. О. Мухин, Ю. А. Давыдов, В. В. Заболотный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2021. — № 3(71). — С. 92–101.
4. Степанов Д. Варианты метода «Гусеница»-SSA для прогноза многомерных временных рядов / Д. Степанов, Н. Голяндина // Идентификация систем и задачи управления: труды IV Международной конференции. — М., 2005. — С. 1831–1848.
5. Golyandina N. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package / N. Golyandina, A. Korobeynikov, A. Shlemov et al. // Journal of Statistical Software. — 2015. — Vol. 67. — Iss. 2. — Pp. 1–78.

6. Голяндина Н. Э. Обработка многомерных временных рядов с помощью метода «Гусеница» // Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Н. Э. Голяндина, Д. Л. Данилов; под ред. Д. Л. Данилова, А. А. Жиглявского. — СПб.: СПбГУ, 1997. — С. 105–131.
7. Надтока И. И. Двумерный метод сингулярного спектрального анализа при моделировании процесса почасового электропотребления летнего периода / И. И. Надтока, О. А. Корнюкова, С. А. Вялкова и др. // Известия вузов. Электромеханика. — 2012. — № 2 — С. 26–30.
8. Иванова К. А. Планирование объема грузоперевозок на станциях ВСЖД методом «SSA-Гусеница» / К. А. Иванова, В. В. Тирских // Информатизация и виртуализация экономической и социальной жизни: материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием. Иркутск, 20 ноября 2019 г. — Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. — С. 230–235.
9. Кулинич Ю. М. Прогнозирование стоимости электроэнергии и состояния изоляции электрооборудования / Ю. М. Кулинич, С. А. Шухарев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2020. — Т. 8. — № 3(30).
10. Иванов В. В. Прогнозирование суточных объемов пассажирских перевозок в Московском метрополитене / В. В. Иванов, Е. С. Осетров // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2018. — Т. 15. — № 1(213). — С. 88–108.
11. Трофимова В. Ш. Экономико-математическое моделирование и прогнозирование электропотребления промышленного предприятия (на примере ОАО «ММК») / В. Ш. Трофимова // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. — 2010. — № 4. — С. 109–114.
12. Ташилова А. А. 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.
13. Golyandina N. Basic Singular Spectrum Analysis and Forecasting with R. / N. Golyandina, A. Korobeynikov // Computational Statistics and Data Analysis. — 2014. — Vol. 71. — Pp. 934–954.
14. Harmouche J. 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. — Iss. 66(1). — Pp. 251–263.

Дата поступления: 04.08.2022

Решение о публикации: 31.10.2022

**Контактная информация:**

МУХИН Олег Олегович — аспирант; [muhinoo@mail.ru](mailto:muhinoo@mail.ru)

# Forecasting Locomotive Run Dynamics Given the Impact of Defects and of Junction Upgrading

O. O. Mukhin

Far Eastern State Transport University, 47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, Russian Federation

**For citation:** Mukhin O. O. Forecasting Locomotive Run Dynamics Given the Impact of Defects and of Junction Upgrading. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 4, pp. 90–105. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-90-105

## Summary

**Purpose:** To improve planning system for depot and factory repairs and for locomotive upgrades in the conditions of new rolling stock delivery on the basis of life-cycle contract by the way of the development and application of mathematical model for prognosing average daily and linear runs given the impact on run of technical-technological, seasonal and random factors as well as defects, limiting junctions, and their upgrading. **Methods:** To achieve the set goal realization, the impact assessment for non-productive downtime of new locomotives at repairs as a result of clearing of junction defects and an equipment and of downtime in waiting for planned repairs on dynamics of average daily and linear runs was carried out. Based on the method of multidimensional spectral singular analysis and the prognosis of time series *Multi-Channel Singular Spectrum Analysis*, the mathematical model on run prognosis which algorithm for, has been embodied in integrated programming environment *Visual Studio* (2019) on C++ programming codes. **Results:** Run determination method given junction and equipment possible defects and given being planned upgrading has been proposed. **Practical importance:** In the conditions of life-cycle contract application which frames in, the participation of locomotives and their components manufacturers in the technical support of supplied products throughout their entire service-life is implied, the usage of the proposed model at repair program monthly, quarterly and annual planning, would reduce the downtime in waiting for putting into a repair position on account of more accurate forecast, rationally distributed repairs, materials, stock of linear equipment between service manufactures.

**Keywords:** Traction rolling stock, electric locomotive, scheduled preventive repair system, locomotive repair, repair planning, prognosis of time series, average daily run, junction upgrading.

## References

1. Davydov Yu. A., Mukhin O. O., Zabolotny V. V. Otsenka vliyaniya sistemnykh eispravnostey lokomotivov na srednesutochnyy probeg [Assessment of the influence of system failures of locomotives on average day run]. *Izvestiya Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies]. 2021, I. 3(47), pp. 31–41. (In Russian)
2. 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, I. 1(73), pp. 123–132. (In Russian)
3. Davydov Yu. A., Mukhin O. O., Zabolotny V. V. Sovershenstvovanie sistemy podderzhki zhiznennogo tsikla lokomotivov [Improvement of the locomotive life cycle support system].

*Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2021, I. 3(71), pp. 92–101. (In Russian)

4. Stepanov D., Golyandina N. Varianty metoda “Gusenitsa”-SSA dlya prognoza mnogomernykh vremennykh ryadov [Variants of the Caterpillar-SSA method for forecasting multidimensional 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. (In Russian)

5. Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package. *Journal of Statistical Software*, v. 67, I. 2, 2015, pp. 1–78.

6. Golyandina N. E., Danilov D. L. *Obrabotka mnogomernykh vremennykh ryadov s pomoshch'yu metoda “Gusenitsa”* [Processing of multidimensional time series using the Caterpillar method. Main components of time series: the Caterpillar method]. St. Petersburg: SPbGU Publ., 1997, pp. 105–131. (In Russian)

7. Nadtoka I. I., Korniyukova O. A., Vyalkova S. A. Dvumernyy metod singulyarnogo spektral'nogo analiza pri modelirovanii protsessa pochasovogo elektropotrebleniya letnego perioda [Two-dimensional method of singular spectral analysis in modeling the process of hourly power consumption in the summer period]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [News of universities. Elektromekhanika]. 2012, I. 2, pp. 26–30. (In Russian)

8. Ivanova K. A., Tirskikh V. V. *Planirovaniye ob'yema gruzoperevozok na stantsiyakh VSZHD metodom “SSA-Gusenitsa”*. *Informatizatsiya i virtualizatsiya ekonomicheskoy i sotsial'noy zhizni: materialy VII Vserossiyskoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Irkutsk, 20 noyabrya 2019 g.* [Planning the volume of freight traffic at the stations of the Higher Railways using the SSA-Caterpillar method. Informatization and virtualization of economic and social life: Proceedings of the VII All-Russian Student Scientific and Practical Conference with international participation. Irkutsk, November 20, 2019]. Irkutsk: Irkutskiy natsional'nyy issledovatel'skiy tekhnicheskii universitet Publ., 2019, pp. 230–235. (In Russian)

9. Kulinich Yu. M., Shukharev S. A. Prognozirovaniye tendentsii razvitiya energetiki zheleznodorozhnogo transporta [Forecasting the development trend of railway energy]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology]. 2020, I. 3(30). (In Russian)

10. 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, I. 1(213), pp. 88–108. (In Russian)

11. Trofimova V. Sh. Ekonomiko-matematicheskoye modelirovaniye i prognozirovaniye elektropotrebleniya promyshlennogo predpri-yatiya (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, I. 4, pp. 109–114. (In Russian)

12. Tashilova A. A., Kesheva L. A., Balkarova S. B. Strukturnyy analiz i prognoz zimnikh osadkov metodom “Caterpillar”-SSA [Structural analysis and forecast of winter precipitation using the Caterpillar-SSA method]. *Doklady AdygsКОЙ (Cherkesskoy) Mezhdunarodnoy akademii nauk* [Reports of the Adyge (Circassian) International Academy of Sciences]. 2013, I. 1, pp. 106–114. (In Russian)

13. Golyandina N., Korobeynikov A. Basic Singular Spectrum Analysis and Forecasting with R. *Computational Statistics and Data Analysis*. 2014, vol. 71, pp. 934–954.

14. Harmouche J., Fourer D. The Sliding Singular Spectrum Analysis: a Data-Driven Non-Stationary Signal Decomposition Tool. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2018, I. 66(1), pp. 251–263.

Received: August 04, 2022

Accepted: October 31, 2022

**Author’s information:**

Oleg O. MUKHIN — Postgraduate Student; [muhinoo@mail.ru](mailto:muhinoo@mail.ru)