

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 656.135.3

doi: 10.30987/2782-5957-2024-1-64-71

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ В ТЕЧЕНИЕ ГОДА

Евгений Сергеевич Козин<sup>1✉</sup>, Альберт Владимирович Мальшаков<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>1</sup> eskozin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6774-3285>

<sup>2</sup> malshakovav@tyuiu.ru

### Аннотация

На процессы изменения качества автомобилей влияют условия и интенсивность их эксплуатации. В исследованиях принято аппроксимировать изменение интенсивности эксплуатации техники в течение года гармоническими моделями, которые позволяют отразить сезонный характер использования техники. Диапазон варьирования интенсивности эксплуатации оценивается коэффициентом вариации. При этом гармонические модели не всегда способны с высокой точностью описать набор данных по эксплуатации техники, а коэффициент вариации не отражает скорость изменения функции интенсивности эксплуатации по месяцам года, которая может влиять на потоки отказов и восстановления.

В связи с этим целью исследования является определение характера изменения интенсивности эксплуатации автомобилей, при котором точность аппроксимации гармоническими моделями уменьшается. Актуальность и новизна исследования за-

ключаются в поиске путей повышения точности имитационного моделирования процессов технической эксплуатации автомобилей, что позволит повысить эффективность управления ресурсами автотранспортных предприятий. В работе использованы методы имитационного моделирования, интерполяции и регрессии с использованием языка программирования Python.

Результатом работы является определение границ диапазона использования гармонических моделей для описания характера изменения интенсивности эксплуатации автомобилей, а также использование наряду с коэффициентом вариации градиента функции как параметров, характеризующих диапазон варьирования интенсивности эксплуатации по месяцам года.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, эксплуатация, автомобили, интенсивность, транспорт, модели.

Ссылка для цитирования:

Козин Е.С. Моделирование изменения интенсивности эксплуатации автомобилей в течение года / Е.С. Козин, А.В. Мальшаков // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 1. – С.64-71. doi: 10.30987/2782-5957-2024-1-64-71.

Original article

Open Access Article

## SIMULATION OF CHANGES IN CAR OPERATION RATE DURING THE YEAR

Evgeny Sergeevich Kozin<sup>1✉</sup>, Albert Vladimirovich Malshakov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

<sup>1</sup> eskozin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6774-3285>

<sup>2</sup> malshakovav@tyuiu.ru

### Abstract

Changes in the quality of cars are influenced by the conditions and rate of their operation. Studies usually approximate the change in the operation rate of equipment during the year with harmonic models that

allow reflecting the seasonal nature of equipment usage. The range of varying the operation rate is estimated by variation coefficient. At the same time, harmonic models are not always able to describe a set of

data on the equipment operation accurately, and the variation coefficient does not show the rate of change in the intensity function of operation by months of the year, which can affect the flows of failures and recovery.

In this regard, the study objective is to determine the nature of the change in the car operation rate, in which the accuracy of approximation by harmonic models decreases. The relevance and novelty of the study is in the search for ways to improve the accuracy of simulation modeling of technical operation of cars, which will improve the efficiency of resource man-

*Reference for citing:*

Kozin ES, Malshakov AV. Simulation of changes in car operation rate during the year. *Transport Engineering*. 2024;1:64-71. doi: 10.30987/2782-5957-2024-1-64-71.

## Введение

На параметры функционирования транспортной системы предприятия влияют условия и интенсивность эксплуатации автомобилей и специальной техники [1]. Интенсивность эксплуатации принято измерять в километрах пробега за единицу времени, как правило, месяц. Основным

$$Y_i = Y_0 + \sum_{k=1}^g A_{Yk} \text{Cos}(m(kT_i - T_{0k})), \quad (1)$$

где  $Y_0$  – среднее значение  $Y$  за цикл;  $k$  – номер гармоники;  $g$  – количество гармоник;  $A_{Yk}$  – полуамплитуда колебания  $k$ -ой гармоники;  $m$  – интервал между  $T_i$  и  $T_{i+1}$  в градусах;  $T_{0k}$  – начальная фаза колебания в градусах.

Как правило, характер изменения интенсивности эксплуатации техники для условий Западной Сибири имеет сезонный максимум, соответствующий осенне-зимнему периоду, когда техника используется наиболее интенсивно ввиду установления дорожного покрытия и прекращения распутицы [4]. В летний период интенсивность использования техники снижается по вышеуказанным причинам. Влияние условий эксплуатации также может быть описано гармоническими моделями с точками минимума, наоборот, в осенне-зимний период. Диапазон варьирования интенсивности эксплуатации автомобилей в течение года оценивается коэффициентом вариации [5].

Вместе с этим гармонические модели не всегда позволяют отразить скорость изменения интенсивности эксплуатации по месяцам. Модель тригонометрической

агментации моторного транспорта предприятий. В работе используются методы моделирования, интерполяции и регрессии с использованием языка программирования Python.

Результатом работы является определение границ использования гармонических моделей для описания характера изменений в скорости эксплуатации автомобилей, а также использование функции градиента вместе с коэффициентом вариации как параметрами, характеризующими диапазон изменений в скорости эксплуатации по месяцам года.

**Ключевые слова:** моделирование, эксплуатация, автомобили, скорость, транспорт, модели.

фактором, отражающим влияние условий эксплуатации, является температура воздуха [2]. Как было установлено исследователями, эти параметры подвержены сезонному изменению и могут быть описаны гармоническими моделями вида [3]:

функция характеризуется одинаковой интенсивностью снижения и роста значений от точек экстремума, что соответствовало бы одинаковой интенсивности увеличения среднемесячного пробега автомобилей и его замедления [6, 7]. Однако на практике парк техники после периода простоя может сразу вводиться в эксплуатацию под конкретные объемы работ, которые могут иметь сезонный характер. Так же резко техника может быть направлена на стоянку после выполнения фиксированной работы, например, после закрытия контракта на перевозки грузов и пассажиров. Такой подход характеризуется резким увеличением интенсивности эксплуатации от минимальных или нулевых значений к максимальным [8].

Гипотеза исследования состоит в том, что гармонические модели могут аппроксимировать некоторые эмпирические данные об эксплуатации техники с достаточно высокой точностью, и вместо них для моделирования управления ресурсами автотранспортного предприятия могут быть использованы другие модели.

## Материалы, модели, эксперименты и методы

План исследования включает в себя несколько этапов. Сначала производилось моделирование различных вариантов изменения интенсивности эксплуатации техники в течение года. Затем оценивалось значение коэффициента вариации и производной первого порядка, а также взаимосвязь этих параметров, после чего определялись показатели точности аппроксимации экспериментальных данных с помощью гармонических моделей. Для оценки влияния внешних факторов на интенсивность эксплуатации техники использовалась теория технической эксплуатации автомобилей, а также математическая статистика. Все используемые методы исследования базируются на положениях систем-

ного анализа и системного подхода [9]. В качестве методов исследования использовалось имитационное моделирование с использованием среды программирования *Jupyter Notebook* и языка программирования *Python* [10]. Для моделирования, интерполяции данных, визуализации результатов и определения параметров уравнений регрессии использовались следующие библиотеки *Python*: *numpy*, *scipy*, *matplotlib*, *sklearn*, *hyperopt* и *HOBIT*. Для определения корреляционной взаимосвязи между градиентом функции и коэффициентом вариации, а также между градиентом и коэффициентом множественной детерминации использовались модули *Ms Excel*.

## Результаты

Для эксперимента было смоделировано несколько вариантов изменения интенсивности эксплуатации техники в течение года, имеющих сезонный характер,

точки минимума и максимума которых совпадают, но скорость изменения функции, у которых различна. Графики представлены на рис. 1.

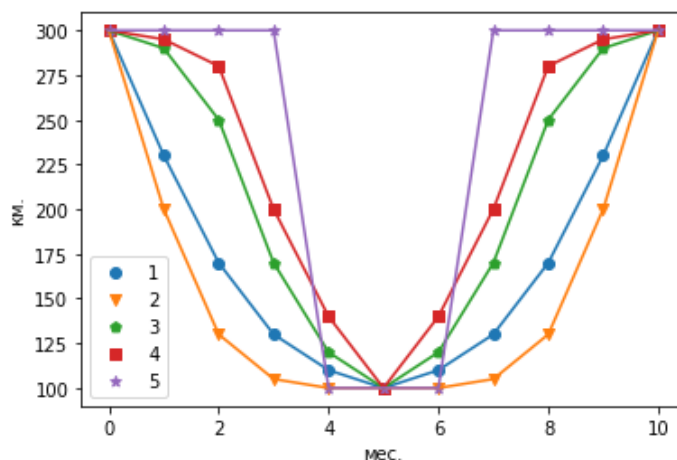


Рис. 1. Смоделированные графики функции изменения интенсивности эксплуатации техники в течение года, характеризующиеся разной скоростью изменения функции  
*Fig. 1. Modeled graphs of the function of changes in the intensity of equipment operation during the year, characterized by different rates of change in the function*

Как правило, степень изменения интенсивности эксплуатации автомобилей в течение года оценивается коэффициентом вариации, характеризующим степень разброса фактических значений от среднего. Однако если оценивать представленные выше графики с точки зрения коэффициента вариации, то у двух функций с разным наклоном кривой к вертикальной оси

может получиться одинаковый коэффициент вариации. Для таких функций корректнее оценивать характер изменения интенсивности эксплуатации техники в течение года величиной градиента функции, который определяется как производная первого порядка. Для расчета градиента функции использовалась функция *gradient(x)* библиотеки *numpy* языка про-

граммирования *Python* [11]. Для удобства сравнения значения коэффициентов вариации и максимального значения производных первого порядка для графиков функций, показанных на рис. 1, сведены в

табл. 1. Графики изменения градиента функций интенсивности эксплуатации автомобилей по времени представлены на рис. 2.

Таблица 1

Значения коэффициентов вариации и производных первого порядка для графиков функций, представленных на рис. 1

Table 1

*The values of variation coefficients and first-order derivatives for the graphs of functions shown in Fig. 1*

Номер функции	Коэффициент вариации	Максимальное значение производной (градиента)
1	0,39	70
2	0,46	100
3	0,35	65
4	0,41	70
5	0,36	100

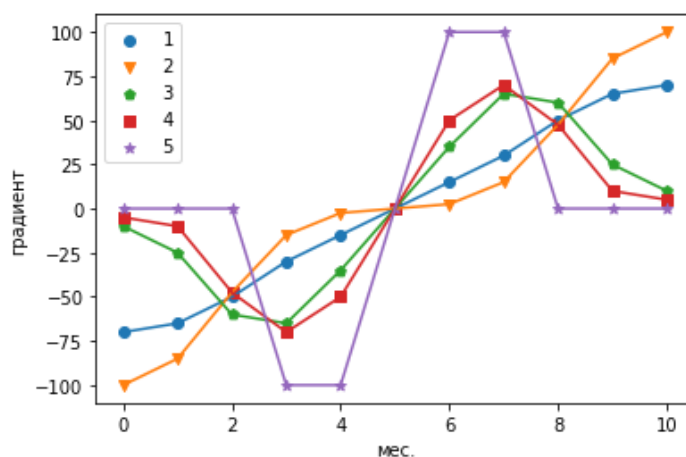


Рис. 2. Графики первой производной функций изменения интенсивности эксплуатации автомобилей в течение года

*Fig. 2. Graphs of the first derivative of the functions of changes in the intensity of vehicle operation during*

Функции, характеризующиеся самым резким изменением интенсивности эксплуатации (2 и 5), имеют самые большие диапазоны изменения градиента (от -100 до 100). Это следует учитывать при моделировании потока отказов и потока восстановления техники на автотранспортном предприятии.

При этом корреляционная связь между показателями коэффициента вариации и градиента функции отсутствует, что представлено на рис. 3.

Следовательно, эти показатели не являются взаимозаменяемыми и каждый из них может быть использован для определенных целей.

Представленные шаблоны графиков функций изначально были сформированы из одиннадцати точек данных, после чего с помощью метода *scipy.interpolate.interp1d* языка программирования *Python* количество точек данных было увеличено до 100 с сохранением характера изменения функции по оси абсцисс. Метод аппроксимирует значение функции, после чего использует интерполяцию для поиска значения новых точек. Увеличение количества точек данных необходимо для повышения адекватности регрессионных моделей и разделение данных на тренировочную и тестовую выборки.

Далее была произведена аппроксимация точек данных тригонометрическими

моделями типа (1), с использованием библиотеки *NOBIT* языка программирования *Python*. Библиотека позволяет определить параметры  $Y_0$ ,  $A_Y$ ,  $m$ ,  $T_0$  для уравнения гармонических колебаний с помощью создания модели класса *RegressionForTrigonometric()* и обучения ее на тренировочных данных. В качестве

метрик оценки точности модели используется коэффициент множественной детерминации  $r^2$  и среднеквадратическая ошибка *mean squared error (MSE)*.

Результаты аппроксимации гармоническими моделями представленных на рис. 1 точек данных показаны на рис. 4.

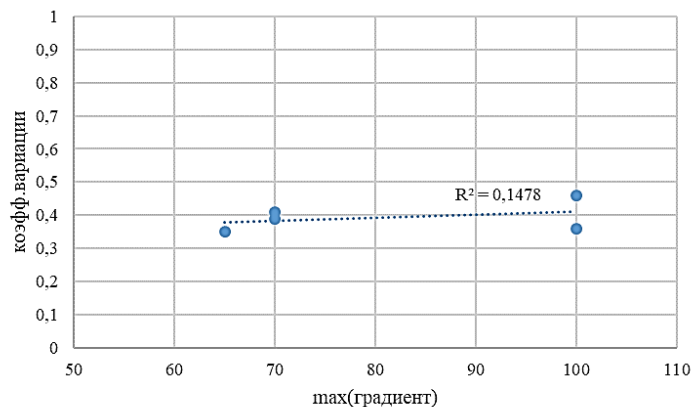


Рис. 3. Корреляционная взаимосвязь между коэффициентом вариации и градиентом функции  
 Fig. 3. Correlation relationship between the coefficient of variation and the gradient of the function

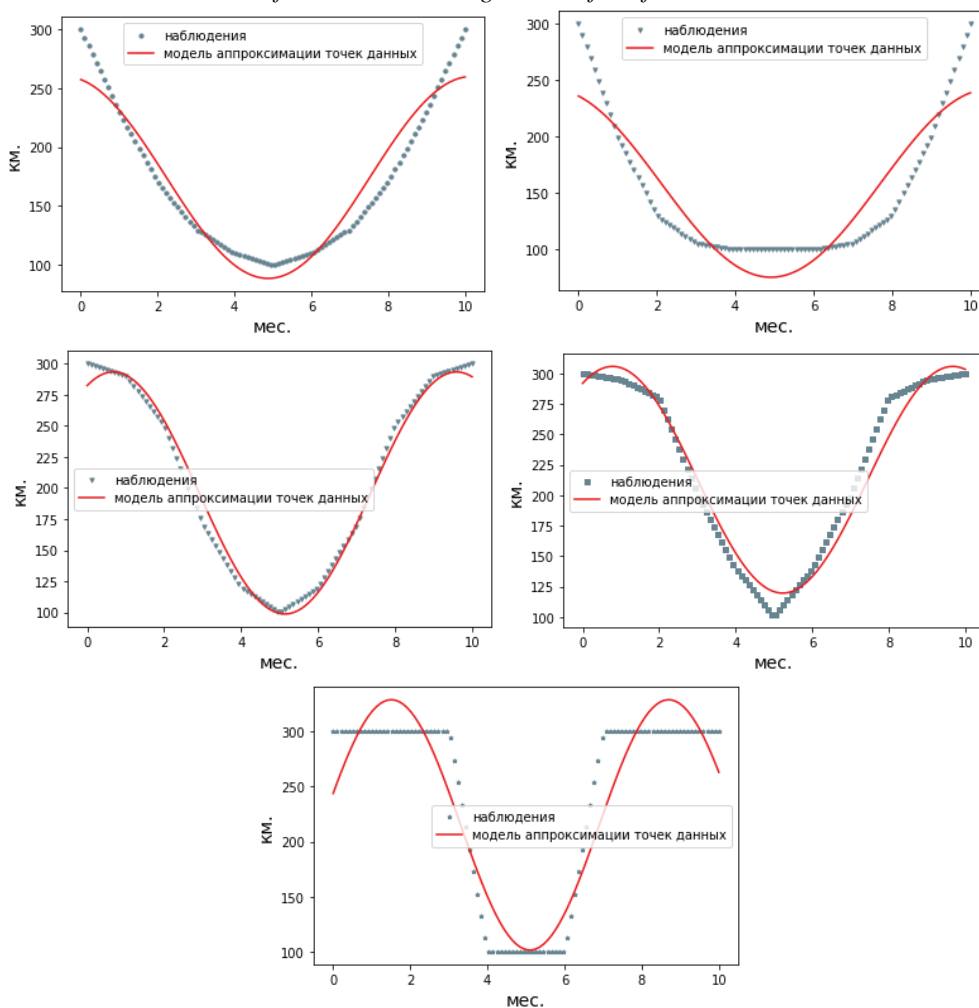


Рис. 4. Аппроксимация смоделированных точек данных гармоническими моделями типа (1)  
 Fig. 4. Approximation of simulated data points by harmonic models of type (1)

Показатели оценки точности моделей аппроксимации сведены в табл. 2 и представлены ниже.

Таблица 2

Значения  $r^2$  и среднеквадратической ошибки для гармонических моделей

Table 2

$r^2$  and RMS error values for harmonic models

Номер функции	$r^2$	MSE
1	0,92	236
2	0,74	791
3	0,98	88
4	0,94	229
5	0,83	1009

### Обсуждение/Заключение

Можно заключить, что гармонические модели с высокой степенью точности описывают функции с плавным изменением значений по оси абсцисс: функции 1, 3, 4. Для функций с высокой скоростью изменения значений (2 и 5) использование гармонических моделей недостаточно эффективно, поскольку точность таких моделей снижается. Примечательно, что самую низкую из представленных моделей точ-

ность при аппроксимации гармоническими моделями имеют функции с максимальным значением градиента. Выявлено наличие обратной корреляционной взаимосвязи между максимальным значением градиента функции и коэффициентом множественной детерминации  $r^2$ : точность гармонической модели снижается при увеличении степени наклона функции к вертикальной оси (рис. 5).

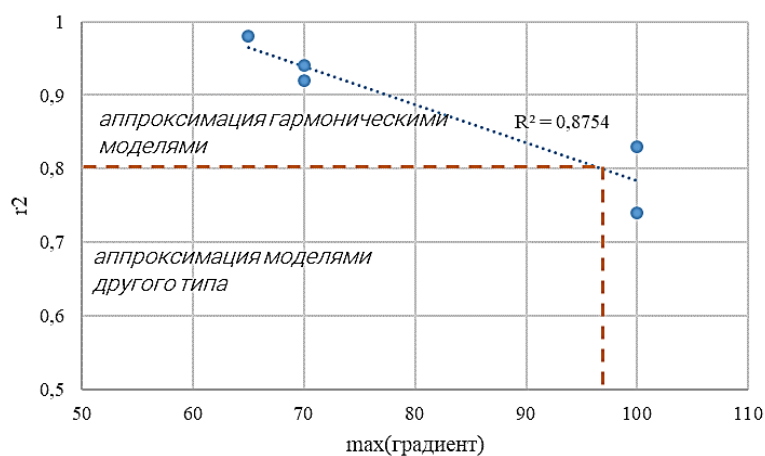


Рис. 5. Взаимосвязь между максимальным значением градиента функции и степенью адекватности аппроксимации точек данных гармоническими моделями типа (1)

Fig. 5. The relationship between the maximum value of the function gradient and the degree of adequacy of approximation of data points by harmonic models of type (1)

Следовательно, такие функции целесообразно описывать другими моделями. При выборе порогового значения точности модели можно определить величину максимального градиента функции, при превышении которого для имитационного моделирования следует применять другие

типы математических моделей, например, модели полносвязных искусственных нейронных сетей (FCNN), что является одной из последующих задач в рамках представленного исследования [12]. На рис. 5 представлен пример определения порогового значения  $r^2$ , равного 0,8. При таком

значении все последовательности точек данных, градиент которых меняется в пределах выше 95, будут описываться гармонической моделью типа (1) с неприемлемой для условий эксперимента точностью. Для моделирования процессов управления ресурсами автотранспортного предприятия с подобным характером изменения интенсивности эксплуатации парка техники может быть использован Для функций, градиент изменения которых меньше 95, в расчетах можно использовать тригонометрические модели без существенной потери точности. Для таких функций в качестве показателя оценки степени варьирования фактических значений интенсивности экс-

плуатации от среднего может быть использован коэффициент вариации.

Таким образом, было установлено, что для оценки неравномерности интенсивности эксплуатации автомобилей в течение года может быть использована величина градиента функции, поскольку она позволяет отразить скорость изменения интенсивности эксплуатации по месяцам года. Для экспериментальных точек данных с резким изменением интенсивности эксплуатации точность аппроксимации гармоническими моделями типа (1) снижается по мере увеличения угла наклона графика функции к вертикальной оси. Для таких выборок следует применять другие виды моделей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захаров, Н.С. Моделирование процессов изменения качества автомобилей: монография / Н.С. Захаров. ТГНГУ. Тюмень, 2002. 128 с.
2. Ракитин, А.Н. Влияние сезонных изменений условий и интенсивности эксплуатации на поток отказов автомобилей : 05.22.10 : дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Ракитин. ТГНГУ. Тюмень, 2004. 190 с.
3. Елесин, С.В. Корректирование нормативов ресурса элементов тормозной системы автомобилей с учетом сезонной вариации интенсивности и условий эксплуатации / С.В. Елесин, А.С. Елесин, А.С. Терехов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – 2 (37). – С. 169.
4. Макарова, А.Н. Методика оперативного корректирования нормативов периодичности технического обслуживания с учетом фактических условий эксплуатации автомобилей : 05.22.10 : дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Макарова. ТГНГУ. Тюмень, 2016. 204 с.
5. Бузин, В.А. Организация технического обслуживания с учетом вариации интенсивности эксплуатации автомобилей / В.А. Бузин, Н.С. Захаров, А.Э. Александров // Транспорт Урала. – 2023. 2 (77). С. 60-65.
6. Fred, L.Terry. A modified harmonic oscillator approximation scheme for the electric constants of

- Alx, Ga1-x, As. / Terry L. Fred // Journal of Applied Physics. 1991. Vol. 70. p. 409-417.
7. Cao, J. Modelling physical systems by effective harmonic oscillators: the optimized quadratic approximation / J. Cao, G. Voth // The journal of chemical physics. 1995. Vol. 102. p. 3338-3348.
8. Taut, M. Generalized gradient correction for exchange: deduction from the oscillator model / M. Taut // A physical review. 1996. Vol. 53. p. 3143.
9. Власов, А.И. Системный анализ технологических процессов производства сложных технических систем с использованием визуальных моделей / А.И. Власов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. — №. 10—17). – С. 17—26.
10. Брусакова, И.А. Имитационное моделирование бизнес-процессов для цифровых двойников / И.А. Брусакова // Петербургский Экономический Журнал. – 2023. — №.1. – С. 51—61.
11. Kim, B. S. Cooperation of simulation and data model for performance analysis of complex systems / B. S. Kim, T. G. Kim //International Journal of Simulation Modelling. 2019. Т. 18. №. 4. С. 608-619.
12. Lambiotte R. From networks to optimal higher-order models of complex systems / R. Lambiotte, M. Rosvall, I. Scholtes //Nature physics. – 2019. – Vol. 15. №. 4. С. 313-320.

## REFERENCES

1. Zakharov NS. Modeling of car quality changes: monograph. Tyumen: TSOGU; 2002.
2. Rakitin AN. The influence of seasonal changes in conditions and intensity of operation on the failure rate of cars [dissertation]. [Tumen (RF)]: TSOGU; 2004.

3. Elesin SV, Elesin AS, Terekhov AS. Correcting the life standard of the automobiles brake system elements, taking into account seasonal variations of operational rate and conditions. Engineering journal of Don. 2015;2 (37):169.
4. Makarova AN. The methodology of operational correlation of the standards of periodical technical

- maintenance, taking into account the actual operating conditions of [dissertation]. [Tyumen (RF)]: TSOGU; 2016.
5. Buzin VA, Zakharov NS, Aleksandrov AE. Organization of technical maintenance taking into account variations in the intensity of car operation. *Transport Urala*. 2023;2 (77):60-65.
  6. Fred L Terry. A modified harmonic oscillator approximation scheme for the electric constants of Alx, Ga1-x, As. *Journ of Applied Physics*. 1991;70:409-417.
  7. Cao J, Voth G. Modelling physical systems by effective harmonic oscillators: the optimized quadratic approximation. *Journ of Chemical Physics*. 1995;102:3338-3348.

8. Taut M. Generalized gradient correction for exchange: deduction from the oscillator model: physical review. 1996;53:3143.
9. 9. Vlasov AI. System analysis of technological processes of producing complex technical systems using visual models *International Research Journal*. 2013;10-2(17):17-26.
10. Brusakova IA. Simulation modeling of business processes for digital doubles. *Petersburg Economic Journal*. 2023;1:51-61.
11. Kim BS, Kim TG. Cooperation of simulation and data model for performance analysis of complex systems. *International Journal of Simulation Modelling*. 2019;18(4):608-619.
12. Lambiotte R., Rosvall M, Scholtes I. From networks to optimal higher-order models of complex systems. *Nature Physics*. 2019;15(4):313-320.

#### **Информация об авторах:**

**Козин Евгений Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент Тюменского индустриального университета, Scopus-Author ID: 57052768700, Research-ID-Web of Science: D-8474-2019, Author-ID-РИНЦ 757307, тел. 89129243991.

**Мальшаков Альберт Владимирович** – кандидат технических наук, старший преподаватель Тюменского индустриального университета, Author-ID-РИНЦ 789968, тел. 89220778806.

**Kozin Evgeny Sergeevich** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Industrial University of Tyumen, Scopus-Author ID: 57052768700, Research-ID-Web of Science: D-8474-2019, Author-ID-RSCI 757307; phone: 89129243991.

**Malshakov Albert Vladimirovich** - Candidate of Technical Sciences, senior lecturer at Industrial University of Tyumen, Author-ID-RSCI 789968; phone: 89220778806.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 10.11.2023; одобрена после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 27.12.2023. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 10.11.2023; approved after review on 15.12.2023; accepted for publication on 27.12.2023. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**