

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 67.02

doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-64-70

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Андрей Сергеевич Шинкарук^{1✉}, Сергей Валерьевич Беспалько²

^{1,2} Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Москва, Россия.

¹ Shinkarukas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8462-8465>

² besp-alco@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6027-6039>

Аннотация

Совершенствование периодичности технического обслуживания и ремонта (ТОИР) сложных технических систем и изделий всегда является актуальным, так как в его основу заложены календарные периоды или пробегные нормы, которые основываются, как правило, на усредненных аналитических данных. Принцип системы ТОИР в пассажирском сообщении дальнего следования аналогичен принципам, действующим и для многих номенклатур железнодорожной техники, и основан на проведении профилактических технологических операций при достижении каждой единицей подвижного состава регламентированного срока или пробега.

Данные критерии позволяют обеспечить эксплуатацию пассажирских вагонов с высокой надежностью. Вместе с тем, вагоны, как и любые

другие сложные технические системы, совершенствуются и комплектуются новыми, модернизированными или более надежными элементами и узлами. Следовательно, вопрос проведения системы ТОИР также должен на системной основе анализироваться, а также должны предлагаться новые подходы к организации, проведению и периодичности технического обслуживания и ремонта.

Целью работы является оптимизация системы ТОИР пассажирских вагонов на основе оценки их использования на всем периоде жизненного цикла по показателю рентабельности продаж с использованием метода градиентного спуска.

Ключевые слова: вагон, рентабельность, математическая модель, ремонт, обслуживание, оптимизация.

Ссылка для цитирования:

Шинкарук А.С. Оптимизация системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов / А.С. Шинкарук, С.В. Беспалько // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 11. – С. 64-70. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-64-70.

Original article

Open Access Article

OPTIMIZATION OF MAINTENANCE AND REPAIR SYSTEM OF PASSENGER CARS

Andrey Sergeevich Shinkaruk^{1✉}, Sergey Valeryevich Bepalko²

^{1,2} Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, Russia

¹ Shinkarukas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8462-8465>

² besp-alco@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6027-6039>

Abstract

Improving the frequency of maintenance and repair of complex technical systems and products is always relevant, since it is based on calendar periods or mileage standards, which are founded, as a rule, on average analytical data. The principle of maintenance and repair system in long-distance passenger traffic is similar to the principles that apply to many sets of

railway equipment, and is based on preventive technological operations when each unit of rolling stock reaches a specified period or mileage.

These criteria make it possible to ensure the operation of passenger cars with high reliability. At the same time, cars, like any other complex technical systems, are improved and equipped with new, upgraded

or more reliable elements and assemblies. Therefore, the issue of conducting maintenance and repair system should also be analyzed systematically, and new approaches to its organization, implementation and frequency of maintenance and repair should be proposed.

The aim of the paper is to optimize the maintenance and repair system of passenger cars based on an

Reference for citing:

Shinkaruk AS, Bespalko SV. Optimization of maintenance and repair system of passenger cars. Transport Engineering. 2024;11:64-70. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-64-70.

Введение

Существующая система ремонта и технического обслуживания пассажирских вагонов, с учетом внедрения новых методов цифровой диагностики, разработки новых, более надежных и усовершенствованных существующих узлов, и деталей, модернизации элементной базы, позволяет осуществлять новые, более прогрессивные методы оценки периодичности ремонта и обслуживания таких сложных инженерных изделий, к которым, в том числе относится и железнодорожный подвижной состав.

Для этих целей требуется реализация дополнительных теоретических обоснований по следующим основным направлениям: последовательность технологических операций проведения технического обслуживания и проведения планово-предупредительного ремонта (деповской, капитальный), а также использования пассажирского вагона на протяжении всего нормативного срока службы. Объективная оптимизация указанных технологических и регламентных операций обеспечит повышение экономической эффективности использования подвижного состава на эксплуатационной стадии жизненного цикла.

Для формирования методики математического моделирования существующей системы ТОИР необходимо рассмотреть его три основных направления, а именно: длительность и периодичность проведения ремонта и единой технической ревизии с сохранением общей системной структуры; саму структуру ремонтных циклов; а также стоимости плановых видов ремонта.

В качестве критерия математического моделирования наиболее эффективным является оптимизационный показатель, учитывающий стоимость разработки, изготовления и списания вагона. Доктором

assessment of their use over the entire life cycle period in terms of profitability of sales using the gradient descent method.

Keywords: wagon, profitability, mathematical model, repair, maintenance, optimization.

технических наук, профессором Устичем П.А. разработан критерий оценки себестоимости единицы пробега вагона, исчисляемый отношением всех затрат к фактическому сроку службы вагона [1], который применяется при решении оптимизационных задач и нашел широкое применение при расчете железнодорожного подвижного состава (грузовых вагонов) [2, 3, 4, 5].

В данном исследовании рассчитывается и анализируется величина рентабельности от продаж, состоящая в отношении прибыли к выручке от использования вагона на эксплуатационном этапе жизненного цикла.

Существующая система ТОИР пассажирских вагонов для его основных типов и моделей, используемых в настоящее время, регламентирована [6, 7], которая включает в себя обязательные требования проведения профилактического обслуживания и планово-предупредительного ремонта по достижении пробегных или календарных периодов соответственно. Система периодического обслуживания и ремонта схематически и концептуально описана в [8].

По результатам анализа нормативной периодичности проведения единой технической ревизии и планово-предупредительного ремонта следует, что проведение технического обслуживания в объеме ТО-1 и ТО-2 осуществляется примерно с постоянной периодичностью, единая техническая ревизия (ТО-3) и деповской ремонт (ДР) - в зависимости от пробега; при ТО-3 250 или 300 тыс. км пробега (в зависимости от оборудования вагонов роликовыми или кассетными буксовыми узлами); при ДР 500 или 600 тыс. км соответственно. Проведение капитальных ви-

дов ремонта проводится при достижении только календарного периода.

Таким образом, наличие несоответствий и противоречий с общей системой ТОИР, указывающая на риски, а

Результаты

Для оптимизации системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов в качестве критерия рентабельности от продаж (ROS) выразим как отношение прибыли к общей сумме дохода от использования одного вагона, которая примет следующий вид:

$$f(\vec{l}) = \frac{V-Z}{V}, \quad (1)$$

где V – сумма доходов от использования вагона; Z – общая сумма расходов; $\vec{l} = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ – вектор периодичности межремонтных периодов; m – количество межремонтных периодов.

В целом составляющие заключаются в затратах по использованию вагона в период всего жизненного цикла, начиная с постройки и завершая его утилизацией, в затраты также включены расходы на проведение технического обслуживания, текущих и планово-предупредительных ремонтов. Начисление затрат осуществляется по следующим категориям:

- единовременные расходы, представляющие собой затраты на формирование требований к вагону, его разработке, изготовлению и утилизации (разность расходов и доходов от утилизации);

- периодические расходы, к которым относятся затраты на проведение единой технической ревизии, деповских и капитальных ремонтов;

- остальные (распределенные) расходы, складывающиеся из затрат на техническое обслуживание в объеме ТО-1 и ТО-2, текущие отцепочные и безотцепочные ремонты, расходы, связанные с арендой локомотивов с экипажем и содержанием инфраструктуры. В пределах каждого межремонтного пробега (МРП) они выражаются в зависимости от времени в виде суммы линейной и квадратичной функций [1].

Точный метод нахождения глобального экстремума функции нескольких переменных реализуется в решении системы

в отдельных случаях на неоправданно короткие необходимые сроки проведения технического обслуживания или планового ремонта, снижающие экономическую эффективность самой системы.

уравнений, в каждом из которых частая производная приравняется к нулю

$$\begin{cases} \frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_1} = 0; \\ \frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_2} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial f(\vec{l})}{\partial l_m} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Наряду с данным методом также целесообразно применить метод градиентного спуска, позволяющий находить глобальный экстремум функции нескольких переменных [9, 10, 11].

Градиентный спуск представляет собой целенаправленное изменение неизвестных, которое на каждом шаге формирует соответствующий градиент, представляющий собой вектор частных производных целевой функции в следующем виде

$$\vec{\nabla} f = \left\{ \frac{\partial f}{\partial l_1}; \frac{\partial f}{\partial l_2}; \dots; \frac{\partial f}{\partial l_m} \right\}. \quad (3)$$

Частные производные можно определять, как точным, так и численным методами. Полученный градиент (3) определяет направление в сторону глобального экстремума. Для этого каждой неизвестной l_i даются приращения, которые можно представить в следующем виде

$$\begin{cases} l_1 = l_1 + \lambda \cdot \frac{\partial f}{\partial l_1}; \\ l_2 = l_2 + \lambda \cdot \frac{\partial f}{\partial l_2}; \\ \dots \\ l_m = l_m + \lambda \cdot \frac{\partial f}{\partial l_m}, \end{cases} \quad (4)$$

где λ – шаг градиентного спуска.

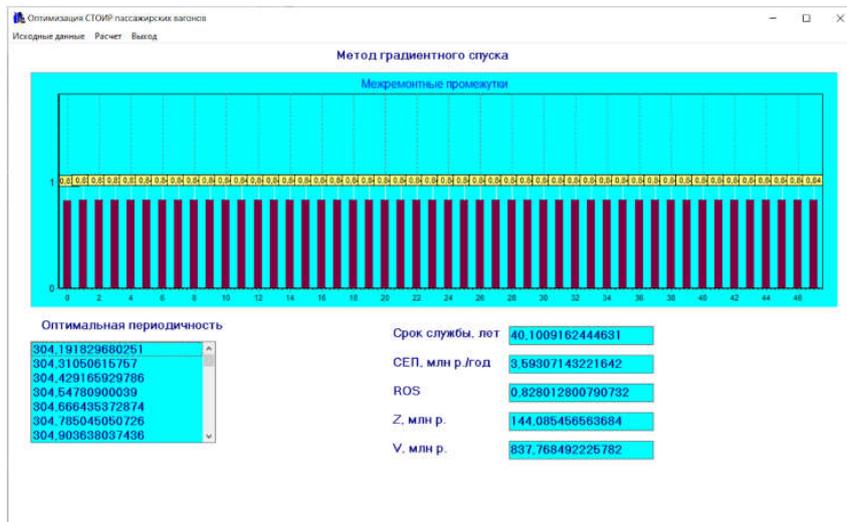
Условием прекращения цикла градиентного спуска целесообразно принять то, что на определенном этапе приращение целевой функции будет меньше заданной величины точности, а именно, $\Delta f \leq \varepsilon$. Однако при разработке метода и программного приложения для ЭВМ наиболее эффективным оказалось использование смены знака градиента, а именно «момент» перехода целевой функции от возрастания к

убыванию. Данное условие принято в качестве признака завершения цикла шагов градиентного спуска.

По результатам, разработанные методики реализованы в виде пакета программных приложений в среде C++ Builder [12, 13, 14]. Исходные данные вносятся в специальном диалоговом окне, а результаты расчетов представляются в виде списка и гистограммы (рис. 1).

На основе данных программ выполнено имитационное моделирование оптимальной системы ТОИР пассажирских вагонов дальнего сообщения и показана зависимость рентабельности от продаж и использования вагона на примере пассажирского вагона с назначенным сроком службы 40 лет (рис. 2), а также зависимости выручки, затрат и прибыли (рис. 3).

а)



б)

Рис. 1. Интерфейс программных приложений в среде C++ Builder:

- а – окно ввода исходных данных в программе оптимизации системы ТОИР пассажирских вагонов;
- б – окно результатов расчета в программе оптимизации системы ТОИР пассажирских вагонов

Fig. 1. The interface of software applications in the C++ Builder environment:
 a - the window for entering initial data in the program for optimizing the MRO system of passenger cars;
 b - the window of calculation results in the program for optimizing the MRO system of passenger cars

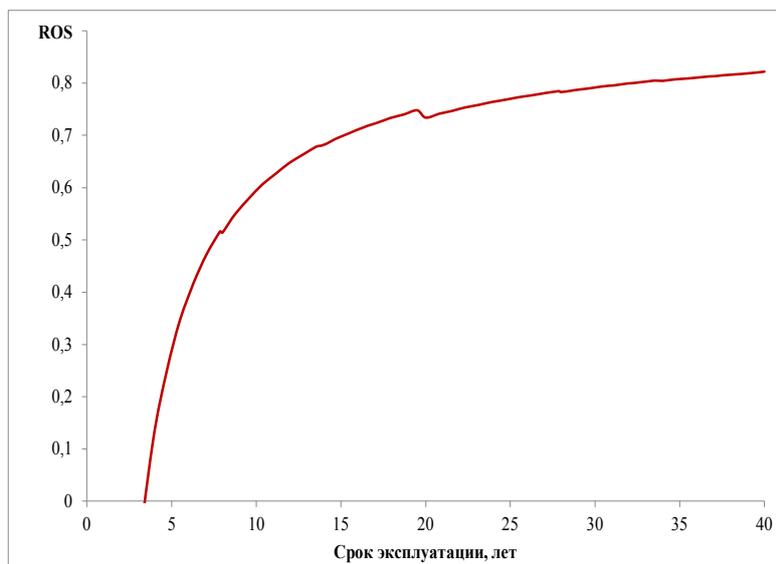


Рис. 2. Зависимость рентабельности от срока эксплуатации
 Fig. 2. Dependence of profitability on the service life

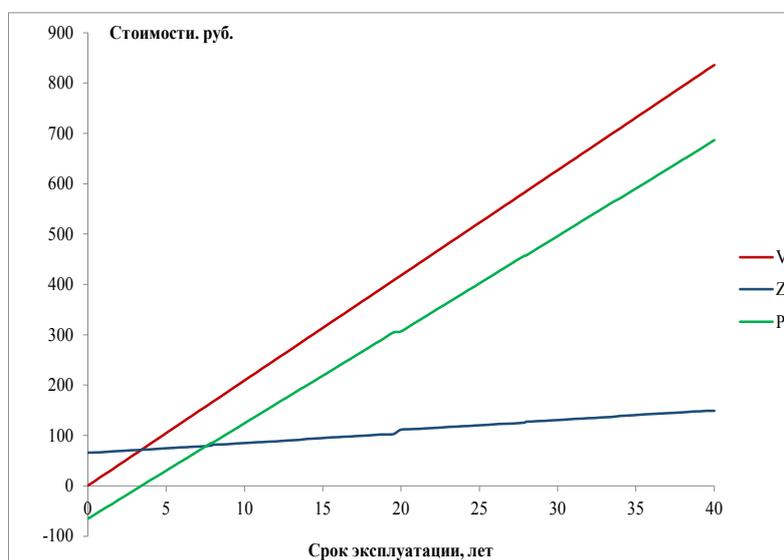


Рис. 3. Зависимость выручки, затрат и прибыли от срока эксплуатации
 Fig. 3. Dependence of revenue, costs and profits on the service life

Заключение

Разработанная программа ЭВМ на основе математического моделирования для оптимизации системы ТОИР на основе оценки рентабельности от продаж и метода градиентного спуска, написанная с применением языка C++ Builder, позволяет оптимизировать длительности межремонтных периодов, периодичности проведения единой технической ревизии и плановых ремонтов, а также систематизировать структуру ремонтных циклов на эксплуатационном этапе жизненного цикла и оценить влияние различных параметров на

результат имитационного моделирования, а именно:

- длительность межремонтных пробегов;
- стоимость крупных ремонтов;
- затрат на ТО-1, ТО-2, ТОР и ТБР;
- величины текущей выручки;
- прочих хозяйственных затрат;
- величины среднесуточного пробега.

Данные методики могут использоваться при проектировании новых пассажирских вагонов и для выбора оптимальной системы ТОИР вагонов, находящихся в эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вагонное хозяйство: учебник для вузов ЖДТ / Под ред. Устича П.А. М.: Маршрут, 2003. 523 с.
2. Устич П.А., Иванов А.А., Мышков В.Г. Дедуктивно-аксиоматический подход к созданию системы интеллектуального управления ЖДТ // Мир транспорта. 2010, №1.
3. Устич П.А., Иванов А.А., Чернышова Л.М. Модель решения оптимизационных задач // Мир транспорта. 2014, №1.
4. Устич П.А., Иванов А.А., Садчиков П.И., Устич Д.П., Шикина Д.И. Методология гармонизации основных положений императива рынка транспортных услуг // Железнодорожный транспорт. 2010, №8.
5. Устич П.А., Иванов А.А., Мажидов Ф.А. Оценка остаточного срока службы деталей на основе данных об отказах / Мир транспорта. Т: 13. Номер: 6 (61). Год: 2015. М.: Издательство: Российский университет транспорта (Москва), 2015. С. 196-205.
6. Приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 4.04.1997 № 9Ц «О введении новой системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов». <https://base.garant.ru/70489520/> (дата обращения 15.03.2024).
7. Приказ Минтранса России от 13.01.2011 № 15 «О внесении изменений в приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 4.04.1997 № 9Ц». <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/6648607/> (дата обращения 15.05.2021).
8. Шинкарук А.С. Совершенствование системы ремонта и технического обслуживания пассажирских вагонов дальнего сообщения / А.С. Шинкарук // Транспортное машиностроение. 2024 Том 5 (29) С. 62-69. <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-5-62-69>.
9. Симонова Е.В. Структуры данных в С# [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Е.В. Симонова. – М-во науки и высш. образования Рос. Фед., Самар. нац. исслед. ун-т им. С.П. Королева (Самар. ун-т), 2018. Ч. 2.
10. Сундукова Т.О. Структуры и алгоритмы компьютерной обработки данных [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Т.О. Сундукова, Г.В. Ваныкина// Электронные текстовые данные. М.; Саратов: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2020. 804 с.
11. Гребенникова И.В. Методы оптимизации : учеб. пособие / И.В. Гребенникова ; науч. ред. В.А. Пухов. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2017. 148 с.
12. Свид. 2024617296 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа оптимизации системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов/ Шинкарук А.С., Беспалько С.В. заявители и правообладатели Шинкарук А.С., Беспалько С.В. (RU). № 2024615418, заявл. 15.03.2024.
13. Свид. 2024617566 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа оптимизации структуры межремонтных промежутков в системе технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов/ Шинкарук А.С., Беспалько С.В. заявители и правообладатели Шинкарук А.С., Беспалько С.В. (RU). - № 2024616492, заявл. 25.03.2024.
14. Свид. 202461849 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа оптимизации системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов на основе рентабельности от продаж/ Шинкарук А.С., Беспалько С.В. заявители и правообладатели Шинкарук А.С., Беспалько С.В. (RU). - № 2024616443, заявл. 25.03.2024.

REFERENCES

1. Ustich PA, editor. Carriage facilities: textbook for railway universities. Moscow: Marshrut; 2003.
2. Ustich PA, Ivanov AA, Myshkov VG. Deductive and axiomatic approach to making an intelligent railway control system. *World of Transport and Transportation*. 2010;1.
3. Ustich PA, Ivanov AA, Chernyshova LM. Model for solving optimization problems. *World of Transport and Transportation*. 2014;1.
4. Ustich PA, Ivanov AA, Sadchikov PI, Ustich DP, Shikina DI. Methods of harmonizing basic provisions of the imperative of the transport services market. *Rail Transport*. 2010;8.
5. Ustich PA, Ivanov AA, Mazhidov FA. Evaluation of the residual service life of parts based on failure data. *World of Transport and Transportation*. 2015;13(6(61)):196-205.
6. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation. Introduction of a New System of Maintenance and Repair of Passenger Cars. [Internet]. [place unknown]; 1997 [cited 2024 March 15]. Available from: <https://base.garant.ru/70489520>
7. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation. On Amendments to the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 04/14/1997 No. 9C [Internet]. [place unknown]; 2011 [cited 2021 May 15]. Available from: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/6648607>
8. Shinkaruk AS. Improvement of repair system and maintenance of long-distance passenger cars.

- Transport Engineering [Internet]. 2024;5(29):62-69. Available from: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-5-62-69>.
9. Simonova EV. Data structures in C#: textbook [Internet]. Samara: Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev; 2018.
 10. Sundukova TO, Vanykina GV. Structures and algorithms of computer data processing: textbook [Internet]. Moscow; Saratov: Internet University of Information Technologies (INTUIT), IPR Media; 2020.
 11. Grebennikova IV. Optimization methods: textbook. Yekaterinburg: Publishing House of Ural University; 2017.

12. Shinkaruk AS, Bepalko SV. RF Certificate 2024617296. Certificate of state registration of a computer program. The program for optimizing the system of maintenance and repair of passenger cars. 2024 March 15.
13. Shinkaruk AS, Bepalko SV. RF Certificate 2024617566. Certificate of state registration of a computer program. The program for optimizing the structure of repair intervals in the maintenance and repair system of passenger cars. 2024 March 25.
14. Shinkaruk AS, Bepalko SV. RF Certificate 202461849. Certificate of state registration of a computer program. The program for optimizing the maintenance and repair system of passenger cars based on sales profitability. 2024 March 25.

Информация об авторах:

Шинкарук Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), тел.: +7 925 804 44 95.

Shinkaruk Andrey Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Russian University of Transport (RUT (MIIT)); phone: +7 925 804 44 95.

Беспалько Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), тел.: +7 905 585 85 36.

Bepalko Sergey Valeryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Cars and Car Facilities, Russian University of Transport (RUT (MIIT)); phone: +7 905 585 85 36.

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 03.10.2024; одобрена после рецензирования 24.10.2024; принята к публикации 28.10.2024. 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 03.10.2024; approved after review on 24.10.2024; accepted for publication on 28.10.2024. 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*.