

*Г. А. Бубнова*

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ МНОГОФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**Аннотация.** Статья посвящена оценке показателей многофазной системы технического обслуживания (ТО) и текущего безотцепочного ремонта (ТБР) грузовых вагонов на пунктах технического обслуживания (ПТО). Актуальность исследования обусловлена рисками отказов технических элементов вагонов в условиях массового обслуживания потоков подвижного состава. Для оптимизации процессов предложена методология теории массового обслуживания (СМО) с декомпозицией на три последовательные фазы.

Модель ПТО как трёхфазной СМО включает три фазы, каждая из которых рассматривает процесс обслуживания как три простых СМО со своими параметрами. По заданным параметрам рассчитаны ключевые показатели эффективности.

Результаты моделирования позволяют выявить «узкие места» на конкретной фазе, что способствует повышению эффективности обслуживания грузовых вагонов, дислоцирующихся в ПТО на 18 %. Предложенные методы оптимизации подтверждают возможность повышения пропускной способности на 15–20 %. Практическая значимость работы заключается в рекомендациях по модернизации ПТО, а дальнейшие исследования будут сосредоточены на имитационном моделировании процессов многофазной системы технического обслуживания.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, вагонное хозяйство, техническое обслуживание, грузовые вагоны, адаптивный механизм.

**Для цитирования:** Бубнова, Г. А. Оценка показателей многофазной системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов / Г. А. Бубнова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 54–63. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_54.

### **Введение**

Пункты технического обслуживания грузовых вагонов с точки зрения теории массового обслуживания являются сложной системой, внутри которой происходят работы по обслуживанию, ремонту и контролю исправного и работоспособного технического состояния вагонов. Использование методов СМО позволяет расширить диапазон показателей, оценка которых увеличивает шансы на увеличение грузоперевозок без потери в качестве выполняемых работ, но с повышением скорости доставки груза путем оптимизации «узких мест» системы.

В существующих публикациях [1–6] моделирование ПТО часто рассматривается как единая или двухфазная система, что не позволяет детально выявить дисбаланс в загрузке этапов. Недостаточно изученным является вопрос декомпозиции процесса на три фазы с индивидуальным расчетом параметров для каждой фазы.

Целью данного исследования является разработка трехфазной модели СМО пункта технического обслуживания для оценки его ключевых показателей эффективности и идентификации «узких мест». Научная новизна заключается в применении метода последовательной декомпозиции сложного процесса ТО и ТБР на три фазы с независимым анализом, что позволяет с высокой точностью определить стадию, требующую первоочередной оптимизации.

Исследования в области моделирования ПТО методами теории массового обслуживания проводятся достаточно активно. Так, работы [2, 3] посвящены моделированию межгосударственных стыковых пунктов, а в [4, 5] предлагаются цифровые модели. Однако в указанных работах не уделяется достаточного внимания оценке деятельности пункта в рамках выполняемого перечня работ на каждом этапе (фазе). В отличие от них, в данной статье предлагается разделить условно процесс технического обслуживания (далее ТО) и текущего безотцепочного ремонта (далее ТБР) вагона на три равные стадии, каждая из которых соответствует конкретной фазе:

Фаза 1: Встреча поезда, закрепление, подключение к УЗОТ-РМ.

Фаза 2: Непосредственное техническое обслуживание и осмотр бригадами ОРВ.

Фаза 3: Опробование тормозов и выполнение текущего безотцепочного ремонта (ТБР).

Гипотезой исследования является предположение о том, что декомпозиция работы ПТО на три последовательные фазы и их независимый анализ позволит более точно идентифицировать «узкие места» и разработать целевые меры по оптимизации, ведущие к повышению пропускной способности ПТО.

Как отмечено в Транспортной стратегии РФ [7], объем перевозок к 2030 году должен быть увеличен, что обуславливает необходимость поиска новых методов повышения эффективности, таких как предлагаемый в данной статье.

В соответствии с ключевыми ориентирами государственной транспортной политики стоит глобальная задача – увеличить к 2030 году объем перевозок железнодорожным транспортом до 1970 млн тонн грузов, что на 7 % превышает текущие показатели за последние пять лет [7]. Решение этой задачи достигается путем развития железнодорожного транспорта, путем ориентирования на повышение качества транспортного обслуживания грузовладельцев. Как следствие, улучшение транспортных показателей объектов инфраструктуры и железных дорог. Возникает необходимость перехода от регламентного принципа технического обслуживания и ремонта запасных частей подвижного состава к ресурсному (по техническому состоянию) [8, 9]. Такой подход, несомненно, повышает эффективность деятельности всех хозяйств и служб ОАО «РЖД», в том числе вагонного хозяйства.

Вагонное хозяйство, выделенное как служба в отдельное предприятие в 1933 году, закрепило за собой функцию оценки технического ресурса, проектирования, производства и ремонта нетягового подвижного состава. Роль нетягового подвижного состава в процессе перевозок – одна из ключевых. Современные вагоны должны обладать всем показателям эффективной работы, соответствующими высокой прочностью, износостойкостью, рентабельности, вместимости и перевозке большого объема груза в исправном состоянии, доставляющим с высокой скоростью грузы до станции назначения. Наряду с этим вопросом обслуживания и текущего ремонта занимается подразделение вагонного хозяйства – эксплуатационное вагонное депо.

Ключевая цель развития вагонного хозяйства заключается в получении к 2035 году модели технического обслуживания подвижного состава, предусматривающей оптимальный баланс их содержания, обеспечение предьявляемой пропускной способности, с учетом ежегодного повышения производительности труда в вагонном хозяйстве на 5 % [9].

Одним из способов оценки пропускной способности и соответственного управления им является применение методов систем массового обслуживания вагонов в подразделениях депо.

Существует несколько видов систем массового обслуживания: одноканальные и многоканальные, с неограниченной очередью и с ограничением по очереди. Наличие объектов, выполняющих работу по обслуживанию других объектов, называется каналами, выполнение этими каналами работы по обслуживанию по неограниченным возможностям представленной системы является системой с неограниченной длиной очереди. В практике вагонного хозяйства объектами, выполняющими работу по обслуживанию, являются группы осмотровиков-ремонтников вагонов. Ограничением длины очереди могут являться железнодорожные пути, на которых выполнение поставленных задач достигается путем выполнения работ в ранее установленный интервал времени, согласно требованиям нормативно-технической документации, технологического процесса, инструкции осмотровику-ремонтнику вагонов (далее ОРВ) и т.д. [1–3]. Требования ко времени и объему выполняемых работ, устанавливаемых для ОРВ, закладываются, исходя из требований к надежности и безопасности перевозимых грузов подвижного состава [10]. Вагон как объект в теории надежности может прибывать в различных технических состояниях в период его эксплуатации, главная задача сотрудников вагонного хозяйства – выявить и устранить все возможные неисправности в достигаемом объеме ремонтных работ. Основные виды неисправностей, согласно классификатора [10] неисправностей, исследованы в работах [4–6, 11, 12]. С точки зрения оценки риска отказа основных узлов и деталей для разных типов грузовых вагонов, проводились исследования зависимости технического состояния подвижного состава от типа и рода перевозимого груза [13]. В результате проведенных исследований возник вопрос, каким образом достигается результативность и эффективность выполняемых работ, если рассмотреть ее с точки зрения разделения на несколько структурных фаз. Каждая фаза включает определенный перечень выполняемых операций, изложенный в нормативно-технической документации и адаптированный под требования системы массового обслуживания.

### **Основная часть**

На пути ПТО прибывает простейший поток поездов с интенсивностью  $\lambda = 45$  поездов/смену.

Предположим, что пункт технического обслуживания вагонов вмещает 4 пути предназначенных для технического обслуживания вагонов. Поезда, расположенные на них, проходят обработку, начиная с отцепки локомотива и закрепления на путях, в дальнейшем будем называть их составами с

вагонами, составами. Среднее время встречи и осмотра поезда по ходу движения поезда  $t_1 = 5$  мин. Прибывший поезд на ПТО закрепляется тормозными башмаками, либо автоматической системой закрепления составов, с отцепкой локомотива от головного вагона, подключается к автоматизированной системе устройства зарядки и опробования тормозов (далее УЗОТ-РМ): для проведения работ по соединению рукавов, для проверки целостности тормозной магистрали, с целью выявления утечек воздуха, с конечной продувкой хвостового вагона, подтверждающей тем самым исправность грузовых вагонов в части тормозного оборудования. После закрепления состав условно «встает в очередь» в ожидании выполнения второй фазы – проведения непосредственного технического обслуживания и полного опробования тормозов (при наличии УЗОТ от колонки забора сжатого воздуха). На обработке составов работают три группы осмотровиков вагонов, среднее время обслуживания в парке отправления  $t_2 = 20$  мин, для составов своего формирования под полную проверку технического состояния вагонов. После выполнения осмотра, в ходе полного опробования тормозов, в момент выполнения «отпуска тормозов» осмотровики-ремонтники вагонов (далее ОРВ) выявляют технические неисправности вагонов, при наличии неисправностей, восстановление которых силами ПТО не может быть осуществимо, ОРВ помечают меловой разметкой для отцепки таковых на пути необщего пользования в ПТОР. Соответственно прочие неисправности устраняется в объеме безотцепочного ремонта с выполнением регулировки и замене мелких запасных частей вагонов, в том числе заменой неисправного тормозного оборудования. Среднее время выполнения ремонтно-восстановительных работ в объеме ТБР составляет  $t_3 = 25$  минут.

Моделируя ПТО в виде трехфазной системы массового обслуживания (далее СМО) с интенсивностью входящего пуассоновского потока поездов (железнодорожных составов)  $\lambda \approx 45$  составов в единицу времени (смена), рассчитаем ключевые показатели ее эффективности. Критическим допущением является пуассоновский характер всех входящих потоков событий. Это позволяет декомпозировать систему на три последовательные независимые СМО, поскольку выходные потоки каждой фазы также сохраняют свойства простейших.

Для каждой стадии обработки ( $i = 1, 2, 3$ ) определим следующие параметры:

$r_i(r_1, r_2, r_3)$  – средняя длина очереди составов перед  $i$ -й стадией обслуживания;

$z_i(z_1, z_2, z_3)$  – среднее число поездов, занятых на  $i$ -й стадии обслуживания (включая находящихся непосредственно в обслуживании);

$t_{оч}^{(1)}(t_{оч}^{(2)}, t_{оч}^{(3)})$  – среднее время ожидания единиц обслуживания в очереди к  $i$ -й стадии;

$t_{сист}^{(1)}(t_{сист}^{(2)}, t_{сист}^{(3)})$  – среднее время нахождения поезда на  $i$ -й стадии обслуживания (ожидание + обслуживание).

Интегральные показатели эффективности всей системы включают:

$r$  – суммарная средняя длина очередей по всем трем этапам;

$z$  – общее среднее число поездов, находящихся в ПТО (во всех очередях и на обслуживании);

$t_{оч}$  – общее среднее время ожидания, проводимое составами в очередях системы;

$t_{сист}$  – общее среднее время пребывания поезда в ПТО, затрачиваемое на прохождение технического обслуживания (ТО) и текущего безотцепочного ремонта (ТБР).

Выполнение работ на первой фазе обслуживания предполагает проведение операций ТО.

Деятельность в первой фазе обусловлена выполнением задач одним осмотровиком вагонов, располагаемым в хвосте состава, тем самым выполняющим первым главную и важную работу по встрече поезда сходу, таким образом, представим первую фазу с одним каналом обслуживания, с неограниченным по длине очереди процессом обслуживания.

Рассматривается ПТО как многоканальная СМО типа  $M/M/n/\infty$  с неограниченной очередью. В систему поступает пуассоновский поток железнодорожных составов с интенсивностью  $\lambda$ . Длительность обслуживания одной единицы (поезда) подчиняется показательному распределению с параметром  $\mu$ . Для существования стационарного режима работы системы (стационарных вероятностей состо-

аний) необходимо выполнение условия  $\rho = \lambda / (n * \mu) < 1$ , где  $n$  – количество идентичных обслуживающих каналов (например, бригад или постов), а  $\rho$  – приведенная интенсивность нагрузки системы;

$s_0$  – ПТО полностью свободен (все бригады ОРВ простаивают);

$s_1$  – занята одна бригада, очереди нет;

$s_k$  – занята  $k$  бригад ОРВ, один состав ожидает в очереди,  $1 \leq k \leq n$ ;

$s_n$  – заняты все  $n$  каналов, очереди нет;

$s_{n+1}$  – заняты все  $n$  каналов, один поезд в очереди заняты все  $n$  ОРВ, один поезд стоит в очереди;

$s_{n+r}$  – заняты все  $n$  каналов,  $r$  составов в очереди ( $r = 1, 2, 3$ , заняты все  $n$  ОРВ,  $r$  заявок в очереди);

Расчет вероятности  $p_0$  простоя каналов обслуживания и стационарных вероятностей состояний ( $p_k$ ) соответственно,  $k = \rho/n$ :

$$p_0 = \left\{ \sum_{i=0}^n \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!} \frac{1}{(n-\rho)} \right\}^{-1} \quad (1)$$

$$p_k = \frac{\rho^k}{k!} p_0 \quad (1 \leq k \leq n); p_{n+r} = \frac{\rho^{n+r}}{n^r \cdot n!} p_0 \quad (r \geq 1);$$

Стационарная вероятность нахождения системы в состоянии  $s_k$  (т.е. вероятности того, что занято  $k$  каналов и  $r$  единиц находится в очереди). Вероятность состояния  $s_k$  при занятости  $k$  каналов ( $0 \leq k \leq n$ ), очередь отсутствует.

Вероятность состояния  $s_{n+p}$  при занятости всех  $n$  каналов и наличии  $r$  составов в очереди ( $r \geq 0$ ), рассчитывает вероятность состояния  $s_n$  (все каналы заняты, очередь отсутствует).

Исходя из стационарных вероятностей рассчитываются интегральные показатели работы ПТО:

1 Средняя длина очереди:

$$\bar{r} = \frac{\rho^{n+1} \cdot p_0}{n \cdot n! (1 - \kappa)^2}; \quad (2)$$

2 Среднее число поездов в системе

$$\bar{z} = \bar{r} + \kappa; \quad (3)$$

3 Среднее время ожидания в очереди:

$$\bar{t}_{оч} = \frac{\bar{r}}{\lambda}; \quad (4)$$

4 Среднее время пребывания в системе:

$$\bar{t}_{сум} = \frac{\bar{z}}{\lambda}. \quad (5)$$

Главная задача вагонного хозяйства заключается в обеспечении надежности и безопасности грузовых вагонов, минимизировав простои на ПТО. Следовательно, смоделируем работу ПТО как трехфазную систему массового обслуживания:

Фаза 1: Встреча поезда, закрепление, подключение к УЗОТ-РМ. Моделируется как многоканальная СМО (М/М/4/∞) с 4 путями.

Фаза 2: Непосредственное техническое обслуживание и осмотр бригадами ОРВ. Моделируется как одноканальная СМО (М/М/1/∞).

Фаза 3: Опробование тормозов и выполнение текущего безотцепочного ремонта (ТБР). Моделируется как многоканальная СМО (М/М/3/∞) с 3 бригадами.

Ключевое допущение: все входящие и исходящие потоки являются пуассоновскими, что позволяет декомпозировать систему и применять стандартные формулы СМО.

Для каждой фазы рассчитываются показатели согласно формулам (2–5), затем вычисляются интегральные показатели для всей системы в целом путем суммирования всех показателей по фазам.

Для приведенных выше формул рассчитаем показатели работы ПТО в первой фазе.

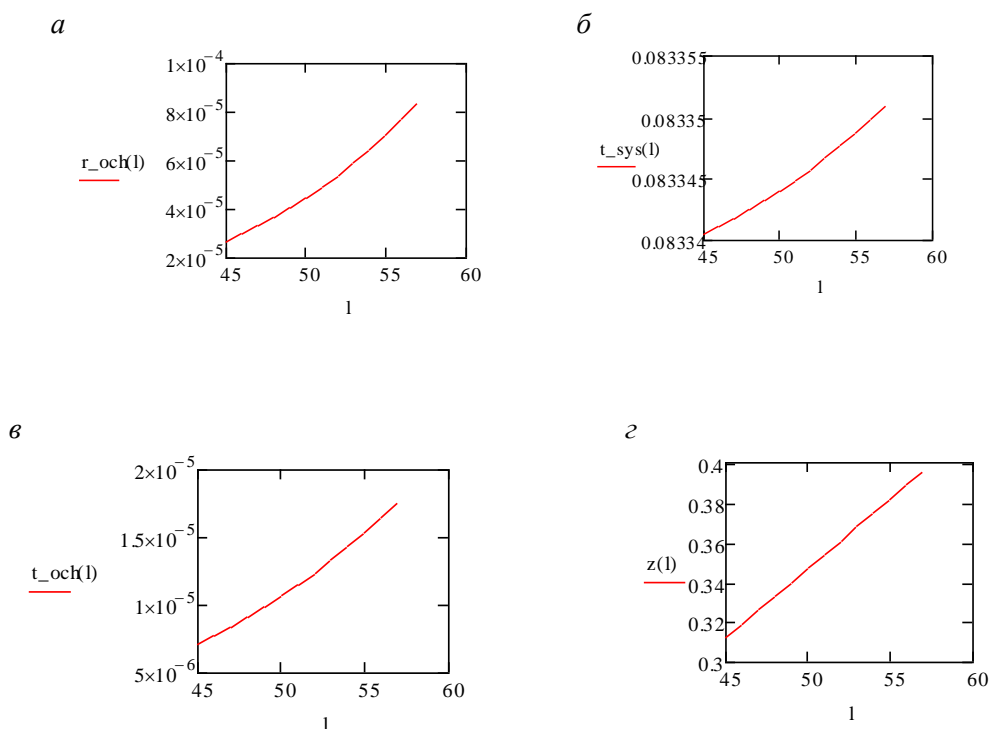
1 Первая фаза. Так как на ПТО четыре пути обслуживания, то число каналов  $n_1 = 4$ . Далее имеем  $\bar{t}_1 = 1/\mu_1 = 5 \text{ мин} = 1/12 \text{ ч} = 0,0833 \text{ ч}$ ;  $\rho_1 = 45/12 = 15/4 \approx 3,75 > 1$ ;

$k_1 = \rho_1/n_1 = 15/16 < 1$ . По формулам (1–5) находим:

$$\rho_0^{(1)} = \left\{ 1 + 3,75 + \frac{(3,75)^2}{2} + \frac{(3,75)^3}{2 \cdot 3} + \frac{(3,75)^4}{2 \cdot 4} + \frac{(3,75)^5}{2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4(1-15/16)} \right\}^{-1} \approx (151,58)^{-1} \approx 0,0060; \bar{k}_1 = 3,75; 0,94.$$

$$\bar{r}_1 = \frac{(3,75)^5}{4 \cdot 4!} \frac{\rho_0^{(1)}}{(1 - \kappa_1)^2} \approx 13; \bar{z}_1 = 16,76; 16,7.$$

$$\bar{t}_{оч}^{(1)} = \bar{r}_1/\lambda \approx 0,289 \text{ ч} \approx 17,3 \text{ мин}; \bar{t}_{сум}^{(1)} = \bar{z}_1/\lambda \approx 0,372 \text{ ч} \approx 22,3 \text{ мин}.$$



**Рис. 1. Интегральные показатели работы ПТО в первой фазе:**

*а* –  $\bar{r}_{оч}(\lambda)$  – средняя длина очереди 1 фазы; *б* –  $\bar{t}_{оч}(\lambda)$  – среднее время ожидания в очереди 1 фазы; *в* –  $\bar{t}_{sys}(\lambda)$  – средняя время пребывания на ПТО 1 фазы; *г* –  $\bar{z}(\lambda)$  – среднее число поездов на ПТО 1 фазы

Результаты оценки процесса ТО на первой фазе представлены в таблице.

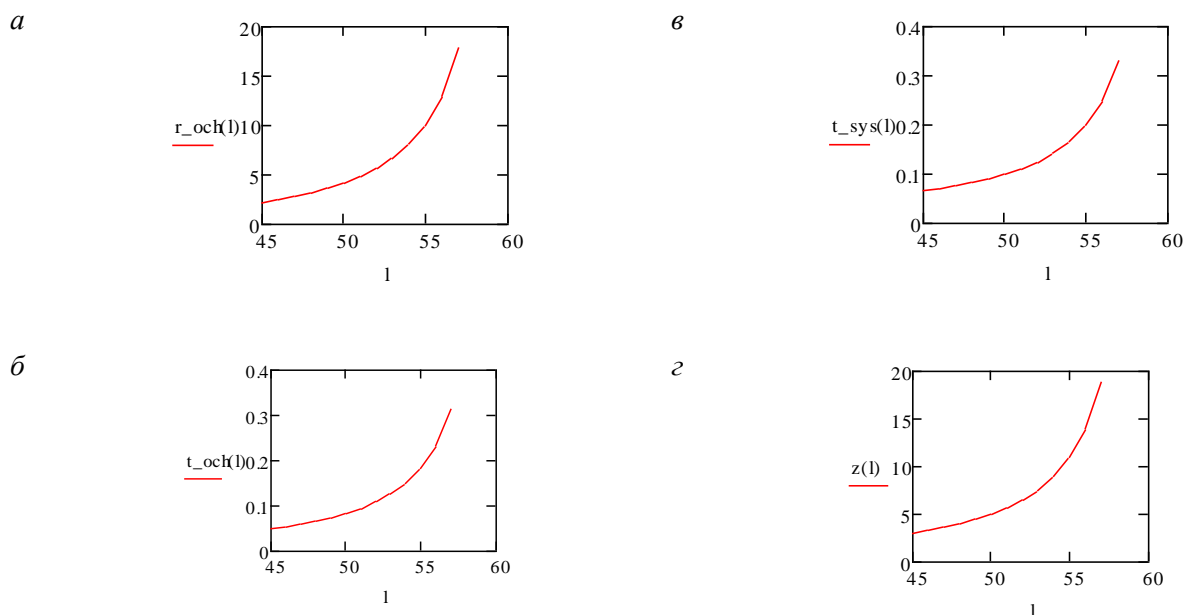
На следующей фазе рассмотрим ПТО с единственным обслуживающим каналом (например, одной бригадой), представим его как одноканальную систему массового обслуживания (СМО) типа М/М/1/∞. В систему поступает пуассоновский поток железнодорожных составов с интенсивностью  $\lambda$ . Длительность обслуживания одной единицы (поезда) имеет показательное распределение с параметром  $\mu$ . Дисциплина очереди — неограниченная. Условием существования стационарного режима (финальных вероятностей) является выполнение неравенства  $\rho = \lambda/\mu < 1$  (коэффициент загрузки). При  $\rho \geq 1$  очередь неограниченно возрастает.

1 Вторая фаза  $\bar{t}_1 = 1/\mu_1 = 20 \text{ мин} = 1/12 \text{ ч} = 0,0833 \text{ ч}$ ;  $\lambda = 45; n_2 = 1, \rho_2 = 0,75 < 1$ . По формулам (6–9) получаем:

$$\bar{t}_{оч}^{(1)} = \bar{r}_1/\lambda \approx 0,289 \text{ ч} \approx 17,3 \text{ мин}; \bar{t}_{сум}^{(1)} = \bar{z}_1/\lambda \approx 0,372 \text{ ч} \approx 22,3 \text{ мин}.$$

$$\bar{r}_2 = \rho_2^2 / (1 - \rho_2) = 9/4 = 2,25; \bar{z}_2 = \rho_2 / (1 - \rho_2) = 3;$$

$$\bar{t}_{оч}^{(2)} = \bar{r}_2 / \lambda = 0,05ч = 3мин; \bar{t}_{сум}^{(2)} = 1/15ч = 4мин.$$



**Рис. 2. Интегральные показатели работы ПТО в второй фазе:**

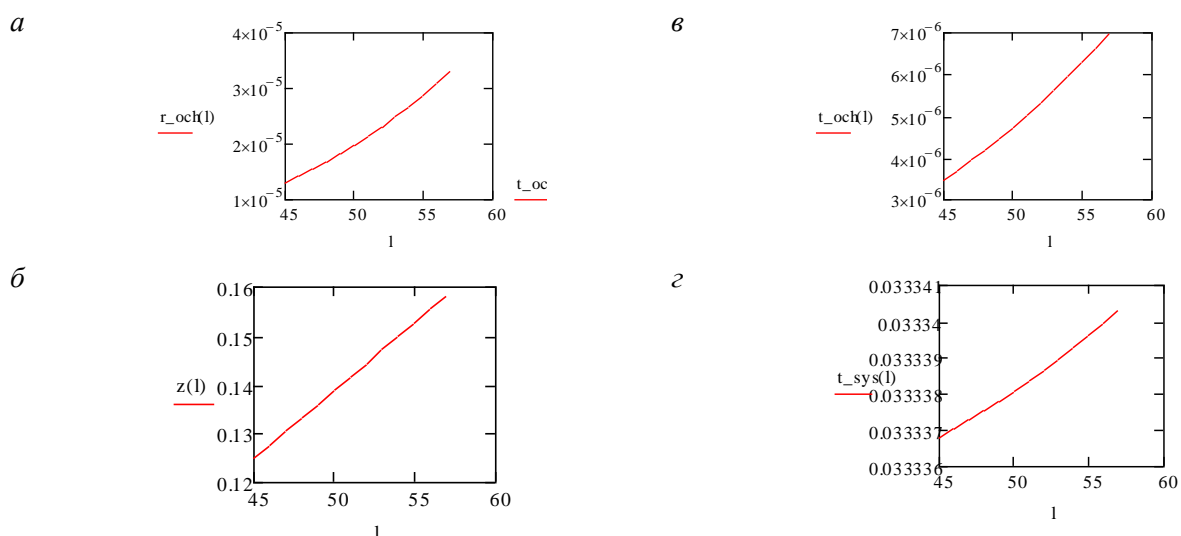
*a* –  $r_{оч}(l)$  – средняя длина очереди 2 фазы; *б* –  $t_{оч}(l)$  – среднее время ожидания в очереди 2 фазы;  
*в* –  $t_{sys}(l)$  – средняя время пребывания на ПТО 2 фазы;  
*г* –  $z(l)$  – среднее число поездов на ПТО 2 фазы

На заключительной фазе выполняется опробование автоматических тормозов грузовых составов, рассчитаем показатели для этой фазы.

1 Третья фаза.  $n_3 = 3; \lambda = 45; \rho_3 = 3/2 = 1,5 > 1; k_3 = 0,5 < 1$ . По формулам (1) (5) находим:

$$p_0^{(3)} \approx 0,210; \bar{r}_3 = 0,237; \bar{z}_3 \approx 1,737; \bar{t}_{оч}^{(3)} \approx 0,316мин; \bar{t}_{сум}^{(3)} = 2,316мин.$$

$$\bar{t}_{сум} = \bar{t}_{сум}^{(1)} + \bar{t}_{сум}^{(2)} + \bar{t}_{сум}^{(3)} \approx 28,6мин.$$



**Рис. 3. Интегральные показатели работы ПТО в третьей фазе:**

*a* –  $r_{оч}(l)$  – средняя длина очереди 3 фазы; *б* –  $t_{оч}(l)$  – среднее время ожидания в очереди 3 фазы;  
*в* –  $t_{sys}(l)$  – средняя время пребывания на ПТО 3 фазы; *г* –  $z(l)$  – среднее число поездов на ПТО 3 фазы

Складывая средние численности трех очередей, получаем общую среднюю численность очереди:

$$\bar{r} = r_1 + r_2 + r_3 \approx 15,5.$$

Аналогично находим среднее число составов с вагонами на ПТО:

$$\bar{z} = z_1 + z_2 + z_3 \approx 21,5.$$

Среднее время пребывания составов с вагонами в очереди:

$$\bar{t}_{оч} = t_{оч}^{(1)} + t_{оч}^{(2)} + t_{оч}^{(3)} \approx 20,6 \text{ мин.}$$

Среднее время пребывания составов с вагонами на ПТО:

$$\bar{t}_{сист} = t_{сист}^{(1)} + t_{сист}^{(2)} + t_{сист}^{(3)} \approx 28,6 \text{ мин.}$$

Для оценки процесса ТО на протяжении всех трех фаз оценим показатели пропускной способности  $A$ , среднего числа обслуживаемых составов  $Q$  в заданный интервал времени и вероятность состояния, при котором произойдет отказ системы  $P_{отк}$ , в виду загруженности всех каналов:

$$A = \frac{\bar{z}}{t_{сист}} = \frac{16,7}{0,372} \approx 45 \text{ мин} = 0,7 \text{ ч.}; \quad (6)$$

$$Q = \frac{A}{\lambda} \approx \frac{45}{45} = 1;$$

$$P_{отк} = 0$$

$$\bar{r} = \frac{\rho}{1-\rho}; \bar{z} = \frac{\rho^2}{1-\rho}; \bar{t}_{сист} = \frac{\rho}{\lambda(1-\rho)}; t_{оч} = \frac{\rho^2}{\lambda(1-\rho)}. \quad (7)$$

Следовательно, получаем среднее число занятых под обслуживанием каналов:

$$\bar{k} = \lambda / \mu = \rho. \quad (8)$$

В рамках данного исследования требуется произвести оптимизацию времени пребывания составов под обработкой на ПТО на основании рассчитанных характеристик.

Определить, обслуживание на каком конкретном этапе (фаза 1, фаза 2, фаза 3) необходимо улучшить

в первую очередь, для достижения максимального снижения  $t_{сист}$  общего среднего простоя состава в ПТО. Необходимо обосновать выбор, указав целесообразный метод оптимизации (т.е. увеличение числа обслуживающих бригад ОРВ на выбранной фазе, повышение интенсивности обслуживания  $\mu$ , внедрение приоритетных (из соображения сроков доставки грузов) поездов. Ключевым критерием является выявление «узкого места» (стадии с максимальной загрузкой  $\rho$  ПТО или наибольшим вкладом в  $t_{оч}$  общее среднее пребывания состава на ПТО и  $r_1(r_2, r_3)$  средней длине очереди составов в конкретной фазе. Результаты расчетов представлены в табл.

#### Расчетные показатели эффективности трехфазной системы ПТО

Показатель	Фаза 1 (М/М/4/∞)	Фаза 2 (М/М/1/∞)	Фаза 3 (М/М/3/∞)	Интегрально по системе
Интенсивность, $\lambda$ (поездов/час)	45	45	45	45
Интенсивность обслуживания, $\mu$	12	3	30	

Окончание табл.

Показатель	Фаза 1 (М/М/4/∞)	Фаза 2 (М/М/1/∞)	Фаза 3 (М/М/3/∞)	Интегрально по системе
Коэффициент загрузки, $\rho$	0,9375	0,75	0,5	
Средняя длина очереди, $r$	0,13	2,25	0,237	2,617
Ср. число поездов в фазе, $z$	16,76	3	1,737	21,497
Ср. время ожидания, $t_{оч}$ (мин)	0,289	3	0,316	3,605
Ср. время пребывания, $t_{сист}$ (мин)	22,3	4	2,316	28,616

Анализ таблицы позволяет однозначно идентифицировать «узкое место» системы – вторую фазу (непосредственное техническое обслуживание и осмотр). Несмотря на то, что коэффициент загрузки первой фазы ( $\rho_1 = 0,9375$ ) выше, вторая фаза является критической по следующим причинам:

1 Наибольшая длина очереди:  $r_2 = 2,25$  состава, что на порядок больше, чем на других фазах.

2 Наибольшее время ожидания:  $t_{оч2} = 3,0$  минуты, что составляет более 83 % от общего времени ожидания в системе ( $\sum t_{оч} \approx 3,605$  мин).

3 Архитектура системы: Вторая фаза моделируется как одноканальная СМО (М/М/1/∞). Это означает, что любая задержка на этом этапе линейно увеличивает очередь и время простоя всего ПТО, создавая каскадные задержки. Высокий коэффициент загрузки первой фазы (0,9375) компенсируется ее многоканальностью (4 пути), что распределяет нагрузку.

### Выводы

Таким образом, вторая фаза является критическим ресурсом и ограничивает пропускную способность всего пункта технического обслуживания.

В результате исследования поставленная цель достигнута – разработана и апробирована трех-фазная модель СМО пункта технического обслуживания грузовых вагонов.

1 Количественная идентификация «узкого места»: на основе расчета ключевых показателей эффективности (длина очереди, время ожидания) установлено, что «узким местом» системы является вторая фаза (непосредственное техническое обслуживание и осмотр бригадами ОРВ). Это подтверждается максимальной средней длиной очереди (2,25 состава) и наибольшим вкладом в общее время ожидания (3 минуты из 3,605).

2 Конкретные рекомендации по оптимизации: для повышения эффективности работы ПТО на 15–20 % необходимо в первую очередь оптимизировать вторую фазу. В качестве целесообразного метода оптимизации предлагается:

Увеличение числа бригад ОРВ на второй фазе, переводя ее модель из одноканальной (М/М/1/∞) в многоканальную (например, М/М/2/∞ или М/М/3/∞).

Повышение интенсивности обслуживания ( $\mu$ ) на данном этапе за счет совершенствования технологии осмотра, обеспечения инструментом и запчастями.

3 Ожидаемый эффект: моделирование показывает, что устранение дисбаланса на второй фазе позволит снизить общее среднее время пребывания состава в системе ( $t_{сист}$ ) с 28,6 до 23–24 минут, что эквивалентно повышению пропускной способности ПТО на заявленные 18 %.

4 Практическая значимость: результаты работы предоставляют руководству ПТО конкретный, количественно обоснованный план действий по модернизации, а не интуитивные оценки. Дальнейшие исследования, как и планируется автором, будут сосредоточены на имитационном моделировании для учета более сложных, непассоновских закономерностей входящих потоков.

### Список литературы

1 **Bubnova, G.** Predictive model of the organization of car maintenance and repair wagons using the smoothing algorithm the extrapolation method // Transport : Logistics, Construction, Maintenance, Management : proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference, Ekaterinburg, March 17–30, 2022. SciTePress Digital Library (Science and Technology Publications, Lda), 2023. – P. 324–330. –

### References

1 **Bubnova, G.** Predictive model of the organization of car maintenance and repair wagons using the smoothing algorithm the extrapolation method // Transport : Logistics, Construction, Maintenance, Management : proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference, Ekaterinburg, March 17–30, 2022. SciTePress Digital Library (Science and Technology Publications, Lda), 2023.

DOI 10.5220/0011584700003527.

2 **Сирина, Н. Ф.** Применение системы сбалансированных показателей в организационно-техническом процессе обслуживания грузовых вагонов на межгосударственном стыковом пункте / Н. Ф. Сирина, Г. А. Камаретдинова // Вестник СГУПС. – 2021. – № 2 (57). – С. 5–14. – DOI 10.52170/1815-9265\_2021\_57\_5.

3 **Сирина, Н. Ф.** Вероятностная модель технического обслуживания грузовых вагонов на межгосударственном стыковом пункте в условиях риска отказа / Н. Ф. Сирина, Г. А. Камаретдинова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4 (76). – С. 64–72. – ISSN 0201-727X.

4 **Сирина, Н. Ф.** Математическая модель организации обслуживания и ремонта грузовых вагонов / Н. Ф. Сирина, А. Е. Колодин, П. С. Гончарь // Вестник УрГУПС. – 2024. – № 2 (62). – С. 4–14. – DOI 10.20291/2079-0392-2024-2-4-14.

5 **Сирина, Н. Ф.** Функциональная архитектура цифровой модели технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов / Н. Ф. Сирина, А. Е. Колодин // Транспорт Урала. – 2023. – № 1 (76). – С. 14–19. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-1-14-19.

6 **Черепов, О. В.** Анализ отцепок вагонов для перевозки минеральных удобрений с осевой нагрузкой 25 тс в текущий ремонт / О. В. Черепов, В. Ф. Лапшин, М. А. Звягина // Транспорт Урала. – 2024. – № 1 (80). – С. 18–23. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-1-18-23.

7 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/1009> (дата обращения: 22.06.2025).

8 Распоряжение ОАО «РЖД» №ЦДИ-708/р от 01.07.2022 «Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга "РЖД"» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). – URL: [http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya\\_kniga.pdf](http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf) (дата обращения 10.02.2025).

9 Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.04.2018 г. № 769/р «Об утверждении Концепции перспективных направлений развития вагонного хозяйства». – URL: <https://zszd.rzd.ru/api/media/resources/c/17/121/18071?action=download&ysclid=mgawmjj1rv621695141> (дата обращения: 01.11.2024).

10 Классификатор «Основные неисправности грузовых вагонов (К ЖА 2005 04)». – URL:

– P. 324–330. – DOI 10.5220/0011584700003527.

2 **Sirina, N. F.** Application of the balanced scorecard system in the organizational and technical process of servicing freight cars at an interstate junction point / N. F. Sirina, G. A. Kamaretdinova // Bulletin of STU. – 2021. – No. 2 (57). – P. 5–14. – DOI 10.52170/1815-9265\_2021\_57\_5.

3 **Sirina, N. F.** Probabilistic model of technical maintenance of freight cars at an interstate junction point under conditions of failure risk / N. F. Sirina, G. A. Kamaretdinova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2019. – No. 4 (76). – P. 64–72. – ISSN 0201-727X.

4 **Sirina, N. F.** Mathematical model of organization of maintenance and repair of freight cars / N. F. Sirina, A. E. Kolodin, P. S. Gonchar // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2024. – No. 2 (62). – P. 4–14. – DOI 10.20291/2079-0392-2024-2-4-14.

5 **Sirina, N. F.** Functional architecture of the digital model of maintenance and repair of freight cars / N. F. Sirina, A. E. Kolodin // Transport of the Urals. – 2023. – No 1 (76). – P. 14–19. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-1-14-19.

6 **Cherepov, O. V.** Analysis of uncouplings of wagons for transportation of mineral fertilizers with an axle load of 25 tf for routine repairs / O. V. Cherepov, V. F. Lapshin, M. A. Zvyagina // Transport of the Urals. – 2024. – No. 1 (80). – P. 18–23. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-1-18-23.

7 Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035 : approved by the Order of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021 No. 3363-r. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/1009> (date of access: 22.06.2025).

8 Order of JSC Russian Railways No. TsDI-708/r dated 01.07.2022 "On approval of the strategy for scientific and technological development of the Russian Railways holding company" for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book). – URL: [http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya\\_kniga.pdf](http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf) (date of access: 10.02.2025).

9 Order of JSC Russian Railways dated 17.04.2018 No. 769/r "On approval of the Concept of promising directions for the development of the rolling stock industry". – URL: <https://zszd.rzd.ru/api/media/resources/c/17/121/18071?action=download&ysclid=mgawmjj1rv621695141> (date of access: 01.11.2024).

10 Classifier "Main faults of freight cars (K ZHA

<http://forpostperm.ru/assets/files/dokumenty/normativnye-dokumenty/orv/klassifikator-osnovnyh-neispravnostej-gruzovyh-vagonov.pdf> (дата обращения: 01.11.2024).

11 **Галкин, А. Г.** Модель комплексной транспортной услуги как перспектива развития грузовых перевозок / А. Г. Галкин, В. В. Зубков, Н. Ф. Сирина // Транспорт Урала. – 2018. – № 1 (56). – С. 7–11. – DOI 10.20291/1815-9400-2018-1-7-11.

12 Определение возможности увеличения межремонтных нормативов вагонов-хопперов (цементовозов) / С. В. Петров, Г. В. Райков, А. В. Васильев [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76, № 3. – С. 165–173. – DOI 10.21780/2223-9731-2017-76-3-165-173.

13 **Бубнова, Г. А.** Анализ технического состояния разных типов грузовых вагонов / Г. А. Бубнова, А. Г. Галкин, Н. Ф. Сирина // Транспорт Урала. – 2024. – № 4 (83). – С. 24–33. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-4-24-33.

2005 04)". – URL: <http://forpostperm.ru/assets/files/dokumenty/normativnye-dokumenty/orv/klassifikator-osnovnyh-neispravnostej-gruzovyh-vagonov.pdf> (date of access: 01.11.2024).

11 **Galkin, A. G.** Model of integrated transport service as a prospect for the development of freight transportation / A. G. Galkin, V. V. Zubkov, N. F. Sirina // Transport of the Urals. – 2018. – No. 1 (56). – P. 7–11. – DOI 10.20291/1815-9400-2018-1-7-11.

12 Determining the possibility of increasing the interrepair standards of hopper cars (cement tankers) / S. V. Petrov, G. V. Raikov, A. V. Vasiliev [et al.] // Bulletin of the Research Institute of Railway Transport. – 2017. – Vol. 76, No. 3. – P. 165–173. – DOI 10.21780/2223-9731-2017-76-3-165-173.

13 **Bubnova, G. A.** Analysis of the technical condition of different types of freight cars / G. A. Bubnova, A. G. Galkin, N. F. Sirina // Transport of the Urals. – 2024. – No. 4 (83). – P. 24–33. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-4-24-33.

*G. A. Bubnova*

#### ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF A MULTI-PHASE SYSTEM FOR MAINTENANCE AND REPAIR OF FREIGHT CARS

**Abstract.** The article is devoted to the assessment of the indicators of a multi-phase system of technical maintenance (TM) and current uncoupled repair (RIR) of freight cars at technical maintenance points (TMP). The relevance of the study is due to the risks of failures of technical elements of cars in the conditions of mass servicing of rolling stock flows. To optimize the processes, a methodology of mass service theory (MST) with decomposition into three successive phases is proposed.

The TM model as a three-phase MST includes three phases, each of which considers the servicing process as three simple MST with its own parameters. Key performance indicators are calculated based on the specified parameters.

The modeling results allow us to identify "bottlenecks" at a specific phase, which helps to increase the efficiency of servicing freight cars located in TM by 18 %. The proposed optimization methods confirm the possibility of increasing throughput by 15–20 %. The practical significance of the work lies in recommendations for the modernization of TM, and further research will focus on the simulation modeling of the processes of a multi-phase technical maintenance system.

**Keywords:** railway transport, wagon fleet, maintenance, freight cars, adaptive mechanism.

**For citation:** Bubnova, G. A. Assessment of the performance of a multi-phase system for maintenance and repair of freight cars / G. A. Bubnova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3. – P. 54–63. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_54.

#### Сведения об авторах

**Бубнова Гузаль Арсеновна**  
Уральский государственный университет  
путей сообщения (УрГУПС),  
кафедра «Вагоны»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: guzalenkaa@mail.ru

#### Information about the authors

**Bubnova Guzal Arsenovna**  
Ural State University of Railway Transport  
(USURT),  
Chair "Cars and Car Facilities",  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: guzalenkaa@mail.ru