

## СОСТАВЛЕНИЕ РАСПИСАНИЯ РЕМОНТОВ ЛОКОМОТИВОВ В ПУНКТАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Тюленев И. Д.<sup>1</sup>, Коровкин Д. М.<sup>2</sup>

(Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова, Москва),

Лазарев А. А.<sup>3</sup>, Гришин Е. М.<sup>4</sup>, Хуснуллин Н. Ф.<sup>5</sup>

(ФГБУН Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

*Рассмотрена задача составления расписания ремонтов локомотивов в пунктах технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ). Для каждого локомотива известно время движения до каждого ПТОЛ, степень его важности и время ремонта. Для каждого ПТОЛ задана его удельная производительность по ремонту локомотивов. Каждый ПТОЛ может обслужить любой локомотив. Составлена целевая функция задачи, характеризующая время обслуживания всех локомотивов. Применен эвристический алгоритм локального поиска, минимизирующий время обслуживания всех локомотивов, в котором рассматриваются всевозможные перестановки пар локомотивов в расписании, уменьшающие целевую функцию, и выбирается одна из них согласно введенному параметру. Исследуется зависимость значения целевой функции задачи от параметра выбора перестановки при реализации алгоритма локального поиска. Проведено сравнение суммарных значений целевых функций расписаний, построенных с помощью «жадного» алгоритма и алгоритма локального поиска. С помощью реализации рассмотренных алгоритмов на языке C++ построено расписание обслуживания локомотивов на ПТОЛ и найдено значение суммарной целевой функции в задаче с псевдореальными данными.*

Ключевые слова: локомотивы, техническое обслуживание, локальный поиск, жадный алгоритм, теория расписаний, оптимизация.

### 1. Введение

Россия является одним из мировых лидеров по протяженности железных дорог. Для обеспечения перевозок по такой обширной сети железных дорог необходимо использовать крупный

---

<sup>1</sup> Илья Дмитриевич Тюленев, студент (tiulenev.id19@physics.msu.ru).

<sup>2</sup> Дмитрий Михайлович Коровкин, студент (korovkin.dm19@physics.msu.ru).

<sup>3</sup> Александр Алексеевич Лазарев, г.н.с. (jobmath@mail.ru).

<sup>4</sup> Егор Максимович Гришин, инженер (grishin.em16@physics.msu.ru).

<sup>5</sup> Наиль Фаридович Хуснуллин, к.т.н., н.с. (nhusnullin@gmail.com).

парк локомотивов. В России насчитывается около 20 тысяч локомотивов на различной тяге. Каждый локомотив требует своевременного обслуживания на специализированных пунктах.

Составление расписания обслуживания локомотивов является актуальной задачей. Построение приближенного к оптимальному расписания позволяет избежать «простоя» локомотивов, ожидающих ремонтов, во время которого локомотивы не могут выполнять свои функции, что приводит к снижению эффективности работы железнодорожной сети.

В настоящей работе рассматривается алгоритм распределения локомотивов по пунктам технического обслуживания для любой железнодорожной сети. Схематично железную дорогу можно представить в виде графа, вершинами которого являются станции, а ребрами – железнодорожные пути, соединяющие станции. По ребрам этого графа (железнодорожным путям) поезда движутся от одной вершины (станции) к другой. На некоторых станциях есть пункты технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ). Задачей является построение расписания назначения локомотивов на ПТОЛ, чтобы все локомотивы были обслужены как можно быстрее.

## **2. Обзор задачи**

Анализ работы железнодорожного транспорта показывает необходимость научного подхода к определению оптимального распределения локомотивов по ремонтным предприятиям железной дороги. Решение этой задачи требует составления определенных математических моделей, учитывающих как технические, так и экономические составляющие проблемы.

Различные аспекты проблемы развития ремонтной базы нашли отражение в работах многих авторов. В [1, 2, 4, 8] решается задача оптимального распределения локомотивов с учетом оптимального переходного запаса различного оборудования и периода его пополнения; оптимального числа ремонтных позиций на лимитирующих операциях, обеспечивающего минимум потерь от простоя тягового подвижного состава в ремонте.

В [9] учитываются следующие аспекты: годовая программа ремонта на техобслуживающих предприятиях; количество заявок

на ремонт из депо, эксплуатирующих электровозы; стоимость ремонтов с доставкой электровозов в ремонтные предприятия.

В [7] с помощью симплекс-метода выполнена оптимизация распределения программы ремонтов электровозов постоянного тока между ремонтными локомотивными депо, в качестве целевой функции использована функция суммарных расходов на удовлетворение потребностей в выполнении ремонтов.

В [6] проводится расчет рациональных сроков проведения ремонтов электровозов. В качестве критерия оптимальности выбраны суммарные удельные затраты на выполнение плановых и неплановых ремонтов.

### **3. Постановка задачи**

На некоторых станциях железнодорожной сети находятся локомотивы, нуждающиеся в обслуживании. Для каждого локомотива известны его важность (желательно, чтобы локомотивы с наибольшим коэффициентом важности были обслужены раньше) и количество необходимых ремонтных работ в относительных единицах. На некоторых станциях имеются ПТОЛ. Для каждого ПТОЛ известна его «производительность», выраженная как количество выполняемых ремонтных работ в час. Для каждой пары соседних станций заданы расстояния и средняя скорость движения поезда на нем. Каждый ПТОЛ способен обслужить любой из локомотивов. Нужно определить, в каком порядке и на каких станциях будут обслуживаться локомотивы.

Имеется ряд условий, накладывающих ограничения на процесс обслуживания локомотивов:

- в каждый момент времени на одном ПТОЛ может находиться только один локомотив;
- все локомотивы должны быть обслужены;
- локомотив не может покинуть ПТОЛ после начала обслуживания, пока не будет завершено его обслуживание;
- локомотив может быть обслужен только один раз.

Требуется построить расписание обслуживания локомотивов, назначив каждый локомотив на определенный ПТОЛ. Построенное расписание должно соответствовать как можно

меньшему суммарному времени ожидания обслуживания локомотивов с учетом их важности, времени их прибытия в ПТОЛ и длительности обслуживания в ПТОЛ.

Перейдем к построению математической модели. В некоторых вершинах  $S_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , графа находятся локомотивы  $L_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , нуждающиеся в ремонте. Каждому локомотиву ставится в соответствие некоторое положительное число  $\omega_i$ , характеризующее его «важность». Локомотивы, которые необходимо обслужить быстрее, имеют большее значение  $\omega_i$ . Пусть  $p_i$  – положительное число, определяющее объём необходимых ремонтных работ для локомотива  $L_i$ .

Некоторые вершины графа  $P_j$ ,  $j = 1, \dots, Q$ , являются ПТОЛ. Удельную производительность каждого ПТОЛ обозначим  $c_j$ . Удельная производительность  $c_j$  определяется как объём ремонтных работ, осуществляемых на ПТОЛ  $P_j$  за один час. Обозначим за  $\alpha_{ij}$  время движения локомотива  $L_i$  до ПТОЛ  $P_j$ .

В момент прибытия локомотива на ПТОЛ может оказаться, что он в это время занят обслуживанием другого локомотива. Поэтому введем переменную  $t_j$ , определяющую количество часов, через которое ПТОЛ  $P_j$  освободится для обслуживания нового локомотива.

Построим частичную целевую функцию суммарного времени обслуживания локомотива  $L_i$  на ПТОЛ  $P_j$ , учитывая время движения от текущего местонахождения локомотива до ПТОЛ и обратно, время обслуживания и время ожидания обслуживания:

$$f_i = (2\alpha_i^j + \beta_i^j + t_j) \cdot \omega_i,$$

где  $\beta_i^j = \frac{p_i}{c_j}$  – время ремонта локомотива  $L_i$  на ПТОЛ  $P_j$  в часах.

Введем суммарную целевую функцию как сумму частных целевых функций каждого локомотива. Она характеризует время обслуживания всех локомотивов и её необходимо минимизировать:

$$F = \sum_{i=1}^N f_i \rightarrow \min.$$

#### 4. Решение задачи. Алгоритмы

Задачи составления расписания обычно предполагают огромное количество всевозможных вариантов решения. Конечно, подобные задачи могут быть решены простым методом перебора (можно сравнить между собой значения целевой функции задачи для всех вариантов). Однако в случаях с большим количеством элементов поиск оптимального решения может занять продолжительное время.

В данной работе предложен эвристический алгоритм, строящий устойчивое расписание, близкое к оптимальному. При этом удастся избежать полного перебора всевозможных вариантов расписания. Построенное изначально с помощью жадного алгоритма расписание будет улучшено с помощью алгоритма локального поиска - перестановками пар локомотивов, улучшающими изначальное расписание. При этом будет исследована зависимость уменьшенной целевой функции от выбора перестановки.

В целевую функцию для каждого локомотива входит такой параметр, как время движения этого локомотива от станции базирования до ПТОЛ. Поэтому для реализации алгоритма на первом этапе строится матрица (таблица 1), которая определяет наименьшее время движения каждого локомотива до каждого ПТОЛ.

Таблица 1. Матрица времени движения каждого локомотива до ПТОЛ

		ПТОЛ			
		$P_1$	$P_2$	...	$P_Q$
Локомотивы	$L_1$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	...	$\alpha_{1Q}$
	$L_2$	$\alpha_{21}$	$\alpha_{22}$	...	$\alpha_{2Q}$
	$\vdots$	...			
	$L_N$	$\alpha_{N1}$	$\alpha_{N2}$		$\alpha_{NQ}$

После того как все необходимые параметры для расчета целевой функции явно определены, можно приступить к распределению локомотивов по ПТОЛ.

#### 4.1. «ЖАДНЫЙ» АЛГОРИТМ

Распределим сначала локомотивы на ПТОЛ по жадному принципу. В качестве параметра, по которому определяется приоритет локомотива, было решено выбрать величину «удельной важности» локомотива, равную отношению параметра «важности» локомотива к времени, необходимому на его обслуживание:  $q_i = \frac{\omega_i}{p_i}$ . Такой выбор был сделан в силу [10]. Для нормального функционирования любой железнодорожной сети без экономических потерь важно в первую очередь обслужить локомотивы на наиболее загруженных маршрутах, выполняющие большой объем по перевозке.

Суть алгоритма заключается в следующем. Рассматриваются все локомотивы в порядке уменьшения их удельной важности. Для каждого локомотива вычисляются значения целевой функции при обслуживании на каждом ПТОЛ. Рассматриваемый локомотив назначается на ПТОЛ с наименьшим значением целевой функции при обслуживании на нём. Затем вычисляется значение суммарной целевой функции как суммы целевых функций всех локомотивов. Результатом алгоритма является построенное расписание обслуживания локомотивов с некоторым значением суммарной целевой функции.

---

**Algorithm 1:** Жадный алгоритм

---

Сортируем локомотивы по убыванию параметра  $\frac{\omega_i}{p_i}$ ;  
**for** рассматриваем все локомотивы  $i = 1 \dots N$  **do**  
    **for** для каждого локомотива рассматриваем все ПТОЛ  $j = 1 \dots Q$  **do**  
        Вычисляем значение частичной целевой функции для локомотива  $i$  на ПТОЛ  $j$ :  
         $f_i^j = (2 \cdot \alpha_i^j + \beta_i + t_j) \cdot w_i$ ;  
    **end**  
    Ищем минимальное значение  $f_i^j$  для локомотива  $i$ ;  
**end**  
**for** рассматриваем целевые функции каждого локомотива  $i = 1 \dots N$  **do**  
    Считаем значение общей целевой функции:  
     $F = F + f_i$ ;  
**end**  
**Result:** F

---

Рис. 1. Жадный алгоритм

Выше представлен псевдокод жадного алгоритма (рис 1), распределяющего локомотивы  $L_i$ ,  $i = 1 \dots N$  на ПТОЛ  $P_j$ ,  $j = 1, \dots Q$ .

В результате реализации этого алгоритма строится расписание обслуживания с некоторым значением  $F$  целевой функции.

#### *4.2. ЛОКАЛЬНЫЙ ПОИСК*

Построенное с помощью жадного алгоритма расписание может быть улучшено. С этой целью применяется алгоритм локального поиска. В процессе работы алгоритма рассматриваются всевозможные перестановки пар локомотивов, способные уменьшить значение целевой функции. Конечное улучшенное значение целевой функции зависит от выбора перестановки. В ходе реализации алгоритма определяется эта зависимость.

Работа алгоритма продолжается до тех пор, пока находится хотя бы одна перестановка пар локомотивов, способная уменьшить значение целевой функции. На каждой итерации алгоритма запоминаются перестановки тех пар локомотивов, которые могут привести к уменьшению целевой функции. Из всех этих перестановок выбирается одна (принцип выбора перестановки описывается далее). Совершается эта перестановка, после чего перестраивается и вычисляется новое значение целевой функции. Выбор перестановки определяется с помощью введенного параметра  $\varepsilon \in [0; 1]$ .

Смысл этого параметра следующий. Назовем «лучшей» такую перестановку, которая дает наименьшее значение целевой функции из всех перестановок пар локомотивов, уменьшающих её первоначальное значение. Определение «худшей» перестановки введем, соответственно, наоборот: это перестановка, уменьшающая целевую функцию на наименьшее значение из всех возможных перестановок. Тогда вычислим разницу между целевыми функциями «худшей» и «лучшей» перестановок и умножим её на параметр  $\varepsilon$ . Прибавив полученное значение к значению целевой функции «лучшей» перестановки и найдя среди всех перестановок пар локомотивов ту, значение целевой функции после осуществления которой наиболее близко к этому значению, мы осуществляем выбор перестановки. Ниже приведен

псевдокод описанного выше алгоритма локального поиска (рис. 2).

---

**Algorithm 2:** Локальный поиск

---

```

while пока существуют перестановки, уменьшающие
значение общей целевой функции  $F$  do
     $k = 0$  - количество перестановок для построенного
    расписания, которые могут уменьшить целевую функцию  $F$ ;
    for всег пар локомотивов
         $L_i L_j, i = 1 \dots N, j = 1 \dots N, (i \neq j)$  do
            Сравниваем попарно локомотивы  $L_i L_j$  :
             $P^i$  - ПТОЛ, на который назначен локомотив  $L_i$ ;
             $P^j$  - ПТОЛ, на который назначен локомотив  $L_j$ ;
            1: Назначаем  $L_i$  на  $P^j$ ,  $L_j$  назначаем на  $P^i$ ;
                Вычисляем значение  $F_1$  после такой перестановки;
            2: Назначаем оба локомотива  $L_i$  и  $L_j$  на ПТОЛ  $P^i$ ;
                Вычисляем значение  $F_2$  после такой перестановки;
            3: Назначаем оба локомотива  $L_i$  и  $L_j$  на ПТОЛ  $P^j$ ;
                Вычисляем значение  $F_3$  после такой перестановки;
            Выбираем перестановку локомотивов  $L_i$  и  $L_j$  между
            ПТОЛ  $P^i$  и  $P^j$ , дающую минимальное значение общей
            целевой функции всех локомотивов:
             $F_{i,j} = \min(F_1, F_2, F_3)$ ;
            if  $F_{i,j} < F$  (если новое значение целевой функции
            меньше предыдущего) then
                 $k = k + 1$ ;
                Запоминаем перестановку  $\Omega_k$  локомотивов  $L_i$  и  $L_j$ ;
                Запоминаем значение  $F_k$  для этой перестановки;
            end
        end
    end
    Сортируем перестановки  $\Omega_k$  по возрастанию целевой
    функции;
    Находим разницу между наибольшим и наименьшим
    значениям целевой функции при перестановках  $\Omega_k$ :
     $Distance = F_k - F_i$ 
    С помощью коэффициента  $\epsilon$  определяем перестановку
    которую мы совершим:
     $F_{search} = F_i + Distance \cdot \epsilon \iff \Omega_{search}$ ;
    Совершаем перестановку  $\Omega_{search}$  и перестраиваем
    расписание с учетом этой перестановки;
    Вычисляем новое значение целевой функции  $F$ ;
end

```

11

---

**Result:**  $F$

---

Рис. 2. Алгоритм локального поиска



Было проведено исследование зависимости конечного значения целевой функции после улучшения данным алгоритмом от выбора параметра  $\varepsilon$  (рис. 3).

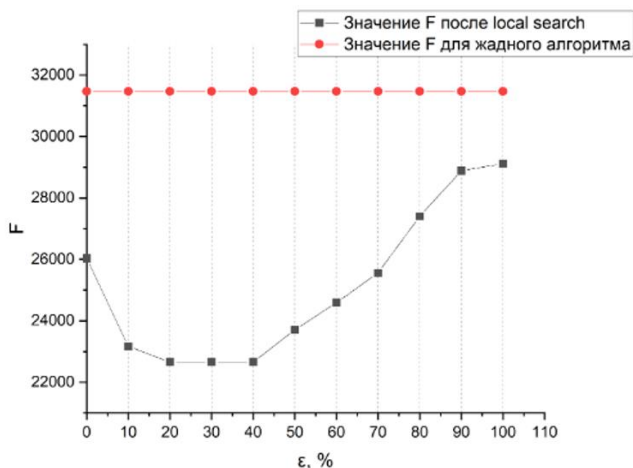


Рис. 3. График зависимости значения целевой функции от параметра  $\varepsilon$  выбора перестановки

## 5. Результаты работы

В ходе работы разработан и протестирован на псевдореальных данных алгоритм распределения локомотивов по ПТОЛ.

Было построено расписание обслуживания локомотивов и определено значение целевой функции для тестового примера, содержащего 100 локомотивов и 15 ПТОЛ.

Показано, что значение целевой функции, полученное с помощью жадного алгоритма, можно улучшить на 30% с помощью алгоритма локального поиска. В общей сложности время работы алгоритма составляет 15 минут, а количество совершаемых перестановок достигает 20.

Определена зависимость целевой функции от выбора перестановки локомотивов и построен график (рис. 3) этой зависимости. Установлено, что наименьшего значения целевой функции в результате алгоритма локального поиска удастся добиться

при выборе параметра  $\varepsilon \in [0,2; 0,4]$ . Это объясняется тем, что при выборе такого параметра целевая функция достигает минимума медленнее. Если же параметр  $\varepsilon \in [0; 0,2) \cup (0,4; 0,1]$ , то целевая функция быстро попадает в локальный минимум.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта №20-38-51010.

### Литература

1. ГОРСКИЙ А.В., ВОРОБЬЕВ А.А., СИМАКИН И.В. и др. *Технологические методы повышения показателей безотказности бандажей колесных пар* // Труды IV научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», 2003, IV-26. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2000. – 18 с.
2. ГОРСКИЙ А.В., СКРЕБКОВ А.В., ЧИГАМБАЕВ Т.О., ЦИХАЛЕВСКИЙ И.С. *Методика и алгоритм оптимального распределения локомотивов по ремонтным предприятиям* // Транспорт Урала. 2008. – Вып. 3(18). – С. 25 – 27.
3. ГРИШИН Е.М., ЛАЗАРЕВ А.А., МУСАТОВА Е.Г., ПРАВДИВЕЦ Н.А. и др. *Оптимизация плана обслуживания локомотивов в депо* // Материалы 12-й Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019, Дивноморское, Геленджик). – Ростов-на-Дону – Таганрог: ЮФУ, 2019. – Т. 1. – С. 178– 181.
4. ЖАКУПОВ К.Б. *Оптимизация параметров технологического процесса ремонта тягового подвижного состава (на примере электровозоремонтного завода Атабасар Республики Казахстан)*: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Москва, 2008. – 130 с.
5. ЛАЗАРЕВ А.А., АРХИПОВ Д.И., ГАЛАХОВ С.А., ГРИШИН Е.М. и др. *Методы решения задачи оптимального планирования работы пунктов технического обслуживания локомотивов* // «Управление товарными потоками и перевозочным процессом на железнодорожном транспорте на основе клиентоориентированности и логистических технологий»:

- коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – Санкт-Петербург: ЛЕМА, 2020. – С. 239-250.
6. СКРЕБКОВ А.В. *Определение оптимальной структуры ремонтного цикла электровозов в конкретных условиях эксплуатации*: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Москва, 2003. – 137 с.
  7. СКРЕБКОВ А.В., ЗИНЧЕНКО С.А. *Оптимизация распределения программы ремонтов электровозов // Мир транспорта*. – 2012. – №5. – С. 72–78.
  8. ЦИХАЛЕВСКИЙ И.С., ВЕТЛУГИНА О.И., КУДАЯРОВ М.М. *Определение оптимальных параметров технологического процесса ремонта тягового подвижного состава // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. – 2011. – Вып. 4(12). – С. 31–38.
  9. ЧИГАМБАЕВ Т.О. *Оптимальное распределение ремонтов ТР-3 (ТО-8) электровозов ВЛ80С между базовыми ДЕПО на железной дороге Республики Казахстан*: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Москва, 2009. – 130 с.
  10. SMITH W.E. *Various Optimizers for Single-Stage Production // Naval Research Logistics Quarterly*. – 1956. – Vol. 3, No. 1–2. – P. 59 – 66.

## SCHEDULING MAINTENANCE OF LOCOMOTIVES AT SERVICE STATIONS

**Ilya Tyulenev**, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Physics Department, student (tyulenev.id19@physics.msu.ru).

**Dmitry Korovkin**, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Physics Department, student (korovkin.dm19@physics.msu.ru).

**Alexander Lazarev**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Science, Russian Academy of Sciences (jobmath@mail.ru).

**Egor Grishin**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Science, Russian Academy of Sciences.

**Nail Khusnullin**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Science, Russian Academy of Sciences.

*Abstract: The scheduling of locomotives repair at points of maintain of locomotives (PML) is considered. For each locomotive, the trip time to each PML, the weight*

*(importance) and the maintain time are known. For each PML the maintain performance is specified. Each PML can maintenance any locomotive. It is required to maintenance all locomotives as quickly as possible. The makespan of the problem is compiled, which characterizes the maintain time of all locomotives. A heuristic local search algorithm is presented that minimizes the maintenance time of all locomotives. In this algorithm all possible permutations of pairs of locomotives in the schedule are considered, reducing the objective function, and one of them is selected according to the introduced parameter. The dependence of the objective function of the problem on the parameter of the permutation choice is investigated in the implementation of the local search algorithm. A comparison is made of the objective functions of the schedules constructed using the "greedy" algorithm and the local search algorithm. With the help of the implementation of the considered algorithms in C++, the schedule of locomotive maintain on PML is constructed and the value of the total objective function for the problem with pseudo-real data is found.*

**Keywords:** locomotives, maintenance, local search, greedy algorithm, scheduling theory, optimization.

УДК 519.8

ББК 39.280.2