

УДК 629.42.083-047.58

Т. С. ГРИШЕЧКІНА^{1*}

^{1*} Каф. «Вища математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна, тел. +38 (0562) 36 26 04, ел. пошта grischechkina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РАЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Знизити експлуатаційні витрати при технічному обслуговуванні локомотивів з урахуванням ресурсів, які споживаються підприємством, та впливу на екологію. Розробити математичну модель раціональної системи утримання тягового рухомого складу, що враховує оптимізацію за трьома показниками: кошти, які витрачаються на ремонти, час, що витрачається на ремонти, витрати екологічних ресурсів при ремонтах. **Методика.** У роботі проведено аналіз сучасних досліджень щодо організації технічного обслуговування та ремонту локомотивів. У якості математичного апарату для знаходження раціональної системи утримання використовується векторна оптимізація за трьома показниками. Сформульовані умови існування розв'язку задачі. Описані властивості, які повинна мати раціональна система утримання локомотиву. **Результати.** Запропонована математична модель, яка дозволяє обирати систему технічного обслуговування та ремонту локомотиву, яка буде задовольняти умовам оптимальності за показниками: вартість ремонту, час ремонту, витрати екологічних ресурсів. **Наукова новизна.** Запропонований новий, комплексний підхід до вибору раціональної системи утримання тягового рухомого складу. Даний підхід дозволяє вирішувати не одну задачу при побудові оптимальної системи технічного обслуговування та ремонту, а будувати раціональну систему утримання за трьома показниками. Перший показник враховує витрати коштів на утримання тягового рухомого складу за весь час його життєвого циклу. Другий показник оптимізує витрати часу на проведення ремонтів та технічних оглядів. Третій показник дозволяє врахувати витрати екологічних ресурсів (води, палива, електрики та ін.) системою утримання локомотиву. **Практична значимість.** Запропонована математична модель при впровадженні дозволить знизити експлуатаційні витрати при технічному обслуговуванні та ремонті локомотиву. Дана модель дозволяє оптимізувати загальні витрати системи утримання на ремонти та заміну деталей локомотиву, загальні витрати часу на проведення ремонтів та витрати природних ресурсів. Доцільне використання запропонованої математичної моделі при розробці такої системи утримання локомотиву, яка дозволить знизити негативний вплив на навколишнє середовище при експлуатації тягового рухомого складу.

Ключові слова: система утримання, локомотив, ремонт, математичне моделювання, векторна оптимізація, екологія.

Вступ

Технічний стан будь-яких технічних об'єктів залізничного транспорту залежить від двох основних груп факторів: від умов експлуатації та обраної системи утримання.

Велика частина експлуатаційних витрат залізниць припадає саме на забезпечення та підтримку технічних об'єктів у працездатному стані. У локомотивному господарстві експлуатаційні витрати йдуть на технічне обслуговування та ремонт локомотивів, а також на оплату енергоресурсів [1]. Удосконалення системи утримання тягового рухомого складу (ТРС) дозволяє скоротити експлуатаційні витрати залізниць.

Вибору раціональної системи утримання присвячено багато наукових праць [1-8]. Теоре-

тичні основи впливу ремонтних впливів на надійність технічних об'єктів залізничного транспорту розглядаються у роботі [2]. В якості математичної моделі ремонтного впливу використовується оператор відновлення. Це дозволило врахувати технологію ремонту та визначити економічні показники обраної системи утримання технічного об'єкту. Вибору та удосконаленню систем утримання тягового рухомого складу присвячені роботи [3-8]. Окремо відмітимо роботи [9, 11] де запропоновано підходи до оцінки якості виконання системи утримання тягового рухомого складу та розглянуті методи оцінки їх життєвого циклу.

В даний час на Укрзалізниці технічне обслуговування і ремонт локомотивів здійснюються по системі планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Дана система утримання передбачає

проведення профілактичних та ремонтних робіт через рівні та кратні проміжки часу або кілометри пробігу. Тобто ремонтні впливи призначаються відповідно до фіксованого графіку. При цьому не враховується фактичний стан ТРС, на який впливають різні умови експлуатації.

На сьогоднішній день для визначення ефективності системи технічного обслуговування та ремонту застосовують комплексні показники: коефіцієнт технічного використання та коефіцієнт готовності. У роботі [11] зазначається важливість вибору ефективної системи утримання для модернізованих або нових локомотивів.

Вдосконалення існуючої системи утримання локомотиву направлено на вирішення таких задач, як:

- скорочення експлуатаційних витрат локомотивного господарства;
- збільшення часу роботи локомотиву;
- зменшення часу простою локомотиву;
- зменшення витрат екологічних ресурсів при ремонтах та експлуатації ТРС.

У роботі [1] запропоновано перелік задач, які необхідно вирішувати при виборі системи технічного утримання локомотиву. Але сучасні умови експлуатації ТРС вимагають комплексного підходу, коли необхідно знаходити оптимальну систему не за одним, а за множиною критеріїв. У такому випадку необхідно застосовувати математичний апарат векторної оптимізації.

Мета роботи

У якості технічного об'єкту залізничного транспорту розглядаємо локомотив. Метою роботи є зниження експлуатаційних витрат при технічному обслуговуванні та ремонті локомотиву, з урахуванням ресурсів, які споживаються підприємством, та впливу на екологію. Дана мета досягається за рахунок удосконалення системи утримання локомотиву. Математична модель раціональної системи утримання ґрунтується на методах векторної оптимізації.

Постановка задачі

Системою утримання технічного об'єкта (локомотива) назвемо наступну послідовність пар:

$$\gamma = [(t_1, V_1), (t_2, V_2), \dots, (t_i, V_i), \dots],$$

де t_i – напрацювання між відновленнями;

V_i – обсяг ремонтного впливу.

Система планових відновлень технічного об'єкта є заданою [2], якщо при будь-якому

$t \in [0, T]$ задано:

$$V_t = \begin{cases} V_i, & \text{якщо } t = t_i, \quad i = \overline{1, n} \\ \emptyset, & \text{якщо } t \neq t_i, \quad i = \overline{1, n} \end{cases}$$

де $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < T$ – напрацювання, після яких виконуються ремонти у відповідних обсягах (V_1, V_2, \dots, V_n) .

Нехай $F_k(V_i)$ – витрати k -го ресурсу при реалізації обраної системи утримання на проміжку часу $[0, T]$.

Для знаходження раціональної системи утримання необхідно вирішувати задачу мінімізації функції-вектору всіх видів витрат:

$$\begin{pmatrix} F_1(V_i) \\ F_2(V_i) \\ \dots \\ F_n(V_i) \end{pmatrix} \rightarrow \min$$

Методика

Система утримання характеризується наступними показниками:

- витрати коштів при ремонтних впливах $F_1(\gamma)$;
- витрати часу на проведення ремонтних впливів $F_2(\gamma)$;
- витрати екологічних ресурсів (витрати води, забруднення навколишнього середовища) при ремонтних впливах $F_3(\gamma)$.

Розглядаємо функції $F_1(\gamma)$, $F_2(\gamma)$, $F_3(\gamma)$ визначені на множині $\Gamma \subseteq E^2$.

Область визначення є:

$$\Gamma = \{\gamma(t, V) : t \geq 0, V \geq 0\}$$

З інженерної точки зору множина Γ – це множина усіх варіантів систем утримання технічного об'єкту. Тобто, це множина усіх послідовностей пар (t, V) , що задають систему утримання ТРС.

Маємо задачу векторної оптимізації за трьома показниками:

$$\begin{pmatrix} F_1(\gamma) \\ F_2(\gamma) \\ F_3(\gamma) \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad (1)$$

де γ – обрана система утримання, набір пар:

$$\gamma = [(t_1, V_1), (t_2, V_2), \dots, (t_i, V_i), \dots, (t_n, V_n)],$$

де t_i – напрацювання між V_{i-1} та V_i відновленнями;

V_i – обсяг i -го ремонтного впливу, об'єм ремонту. З математичної точки зору він являє собою набір всіляких підмножин множини усіх деталей локомотива:

$$V_i \subseteq A(\Omega),$$

де Ω – множина усіх деталей локомотива:

$$\Omega = \{w_k, k = \overline{1, M}\},$$

де w_k – назва k -ї деталі локомотиву;

M – загальна кількість деталей локомотиву.

Розв'язок задачі (1) – це множина $\Gamma_* \subseteq \Gamma$, яка має наступні властивості:

1. Будь-яка система утримання з цієї множини $\forall \gamma \in \Gamma_*$ є ефективною;
2. Будь-які дві системи утримання з цієї множини $\forall \gamma_1, \gamma_2 \in \Gamma_*$ є незрівняними між собою.

Система утримання $\forall \gamma \in \Gamma_*$ є ефективною, якщо знайдуться такі функції $F_i(\gamma)$ та $F_j(\gamma)$, що будь-яка зміна γ приведе до збільшення однієї функції та зменшенню іншої.

Дві системи утримання γ_1 та γ_2 називаються незрівняними, якщо знайдуться дві функції $F_i(\gamma)$ та $F_j(\gamma)$ такі, що виконується одна з двох умов:

$$\left(\begin{array}{l} F_i(\gamma_1) \leq F_j(\gamma_1) \\ F_i(\gamma_2) \geq F_j(\gamma_2) \end{array} \right)$$

або

$$\left(\begin{array}{l} F_i(\gamma_1) \geq F_j(\gamma_1) \\ F_i(\gamma_2) \leq F_j(\gamma_2) \end{array} \right),$$

причому, хоча б одна з нерівностей є строгою.

Розглянемо більш детально визначення функцій для задачі векторної оптимізації (1).

Нехай w_k – k -й елемент технічного об'єкта. Він характеризується трьома показниками:

$F_1(w_k)$ – вартість запасних частин, матеріа-

лів та амортизаційні відрахування на відновлення елемента. Обчислюються за формулою:

$$F_1(w_k) = \sum_{j=1}^J c_j T_{kj},$$

де c_j – витрати на j -у елементарну операцію;

$$T_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j\text{-а операція приймає участь} \\ & \text{при відновленні } k\text{-го елемента;} \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

J – загальна кількість елементарних операцій. Перелік елементарних операцій, їх вартість та час виконання зберігаються у технологіко-економічних картах (ТЕК) локомотивів.

$F_2(w_k)$ – витрати, пов'язані з оплатою праці, які супроводжують відновлення k -го елемента.

$$F_2(w_k) = t^*(w_k) \cdot \bar{c} \cdot p,$$

де \bar{c} – годинна тарифна ставка;

p – кількість робітників, необхідна для відновлення k -го елемента.

$t^*(w_k)$ – час відновлення k -го елемента:

$$t^*(w_k) = \sum_{j=1}^J t_j T_{kj}$$

t_j – тривалість j -ї елементарної операції.

$F_3(w_k)$ – витрати екологічних ресурсів, що супроводжують відновлення k -го елемента (витрати води, енергоресурсів та екологічні збо-ри):

$$F_3(w_k) = \sum_{m=1}^M \left(c_m \cdot \sum_{j=1}^J v_{mj} T_{kj} \right),$$

де M – кількість екологічних ресурсів, які витрачаються при відновленні k -го елемента;

c_m – вартість одиниці m -го ресурсу

v_{mj} – об'єм m -го ресурсу, який витрачається на j -у елементарну операцію.

Визначаємо фінансові витрати системи утримання:

$$F_1(\gamma) = \sum_{i=1}^n F_1(V_i),$$

де $F_1(V_i)$ – витрати на ремонт в обсязі V_i :

$$F_1(V_i) = \sum_{k \in V_i} F_1(w_k)$$

Таким чином:

$$F_1(\gamma) = \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} F_1(w_k),$$

$$F_1(\gamma) = \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \sum_{j=1}^J c_j T_{kj}.$$

Соціальні витрати системи утримання:

$$F_2(\gamma) = \sum_{i=1}^n F_2(V_i).$$

Для визначення потрібної чисельності робочої сили на ремонт локомотивів встановлюються середні норми трудомісткості технічних обслуговувань і ремонтів в чол/год. До норм не включено трудовитрати, пов'язані з обслуговуванням машин, виготовленням і утриманням на ремонт стендів і пристосувань, а так само роботи, що виконуються в інших цехах підприємств.

$$F_2(V_i) = \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \left[\left(\sum_{j=1}^J t_j T_{kj} \right) \cdot \bar{c} \right].$$

Екологічні витрати системи утримання включають в себе витрати на воду, електроенергію, паливо та ін.:

$$F_3(\gamma) = \sum_{i=1}^n F_3(V_i),$$

Де екологічні витрати в обсязі V_i :

$$F_3(V_i) = \sum_{k \in V_i} F_3(w_k)$$

Таким чином:

$$F_3(\gamma) = \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} F_3(w_k),$$

$$F_3(w_k) = \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \sum_{m=1}^M \left(c_m \cdot \sum_{j=1}^J v_{mj} T_{kj} \right).$$

Задача векторної оптимізації приймає наступний вигляд:

$$\left(\begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \sum_{j=1}^J c_j T_{kj} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \left[\left(\sum_{j=1}^J t_j T_{kj} \right) \cdot \bar{c} \right] \\ \sum_{i=1}^n \sum_{k \in V_i} \sum_{m=1}^M \left(c_m \cdot \sum_{j=1}^J v_{mj} T_{kj} \right) \end{array} \right) \rightarrow \min.$$

Результати

За допомогою методів векторної оптимізації розроблена математична модель для вибору раціональної системи утримання тягового рухомого складу. Дана модель задовольняє умові оптимальності за трьома напрямками: вартість ремонту, час ремонту, витрати екологічних ресурсів при ремонтних впливах.

Наукова новизна та практична значимість

Запропонований новий, комплексний підхід до вибору раціональної системи утримання тягового рухомого складу. За допомогою розробленої математичної моделі є можливість будувати раціональну систему утримання для локомотива, яка враховує не лише оптимізацію за коштами та часом на ремонти, а ще й витрати системою утримання екологічних ресурсів. Тобто оптимізація відбувається одночасно за трьома показниками. Перший показник враховує витрати коштів на утримання тягового рухомого складу за весь час його життєвого циклу. Другий показник оптимізує витрати часу на проведення ремонтів та технічних оглядів. Третій показник дозволяє врахувати витрати екологічних ресурсів (води, палива, електрики та ін.) системою утримання тягового рухомого складу.

Висновки

У статті розглядається задача розробки раціональної системи утримання тягового рухомого складу. У якості математичного апарату для моделювання було обрано методи векторної оптимізації. Це дозволило створити математичну модель системи утримання локомотиву, яка обирає раціональні критерії за трьома напрямками. Дана модель дозволяє оптимізувати загальні витрати системи утримання на ремонти та заміну деталей локомотиву, загальні витрати часу на проведення ремонтів та витрати природних ресурсів при ремонтних впливах.

Запропонована математична модель при впровадженні дозволить знизити експлуатаційні витрати при технічному обслуговуванні та ремонті локомотиву.

Пропонується використання даної математичної моделі при розробці такої системи утримання локомотиву, яка дозволить знизити негативний вплив на навколишнє середовище при експлуатації тягового рухомого складу.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Bodnar, B. System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems / B. Bodnar, O. Ochkasov // Transport Means : Proceedings of 21st International Scientific Conference, September 20–22, 2017 / Kaunas University of Technology Klaipėda University [and others]. – Juodkrante, Kaunas, Lithuania, – 2017. – Part I. – P. 43-47. A fragment of the text.

2. Босов, А. А. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог : монография / А. А. Босов, П. А. Лоза / – Дн-ск: Изд-во ООО «Дриант», 2015 – 252 с. – ISBN 978-966-2394-15-3

3. Капіца, М. І. Розвиток наукових основ удосконалення систем утримання тягового рухомого складу : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Михайло Іванович Капіца. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2010. – 39 с.

4. Босов, А. А. Теоретические основы и методика расчета рациональных плановых восстановлений локомотивов и вагонов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Аркадій Аркадійович Босов. – Л.: ЛИИДТ, 1986. – 30 с.

5. Боднар, С. Б. Підвищення експлуатаційної надійності локомотивів шляхом впровадження раціональної системи утримання: дис... канд. техн. наук : 05.22.07 / Євген Борисович Боднар. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2004. – 161 с.

6. Крашенинин, А. С. Влияние наработки локомотивов на корректирование периодичности технического обслуживания и текущего ремонта / А. С.

Крашенинин // Наука и прогресс транспорта. – 2015. – №1 (55). – С.148-154. doi 10.15802/STP2015/38265

7. Bodnar, B. Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways / B. Bodnar, A. Ochkasov, D. Bobyr // Technologijos ir Menas = Technology and Art. – 2016. – № 7. – P. 109-114. <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/8884>

8. Боднар, Б. Е. Использование диагностической информации при разработке системы управления техническим состоянием локомотивов / Б. Е. Боднар, О. Б. Очкасов, Е. Б. Боднар // Локомотив-информ. – 2011. – №3-4. – С.10-13.

9. Гришечкина, Т. С. Оценка качества выполнения системы содержания парка электроподвижного состава / Т. С. Гришечкина, П. А. Лоза // Электрификация транспорта. – 2015. – № 9. – С. 87-93.

10. Фалендиш, А. П. Моделювання зміни коефіцієнту технічного використання маневрового тепловозу для різних систем утримання / А. П. Фалендиш // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – №1/3 (79). – С. 24-31.

11. Тартаковский, Э. Д. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог : монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин. – Луганск : Изд-во «Ноулидж» – 2011. – 174 с.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Боднарем Б. Є. (Україна)

Надійшла до редколегії 05.11.2017.

Прийнята до друку 09.11.2017.

Т. С. ГРИШЕЧКИНА

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СОДЕРЖАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Цель. Снизить эксплуатационные затраты при техническом обслуживании локомотивов с учетом потребляемых предприятием ресурсов и оказываемого влияния на экологию. Разработать математическую модель рациональной системы содержания тягового подвижного состава, которая учитывает оптимизацию по трем показателям: финансовые средства и время, которые тратятся на ремонт, а также траты экологических ресурсов при ремонте. **Методика.** В работе проведен анализ современных исследований об организации технического обслуживания и ремонта локомотивов. В качестве математического аппарата для определения рациональной системы содержания используется векторная оптимизация по трем показателям. Сформулированы условия существования решения задачи. Описаны свойства, которыми должна обладать рациональная система содержания локомотива. **Результаты.** Предложена математическая модель, которая позволяет выбирать систему технического обслуживания и ремонта локомотива, которая будет удовлетворять условиям оптимальности по показателям: стоимость ремонта, время ремонта, расходы экологических ресурсов. **Научная новизна.** Предложен новый, комплексный подход по выбору рациональной системы содержания тягового подвижного состава. Данный подход позволяет решать не одну задачу при построении оптимальной системы технического обслуживания и ремонта, а строить рациональную систему содержания по трем показателям. Первый показатель учитывает расходы финансовых ресурсов на содержание тягового подвижного состава за все время его жизненного цикла. Второй показатель оптимизирует затраты времени на проведение ремонтов и технических осмотров. Третий показатель позволяет учесть расходы экологических ресурсов (воды, топлива, электричества и др.) системой содержания локомотива. **Практическая зна-**

чимость. Предложенная математическая модель при внедрении позволит снизить эксплуатационные расходы при техническом обслуживании и ремонте локомотива. Данная модель позволяет оптимизировать общие затраты системы содержания на ремонты и замену деталей локомотива, общие затраты времени на проведение ремонтов и затраты природных ресурсов. Целесообразно использование предложенной математической модели при разработке такой системы содержания локомотива, которая позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду при эксплуатации тягового подвижного состава.

Ключевые слова: система содержания, локомотив, ремонт, математическое моделирование, векторная оптимизация, экология

T. HRYSHECHKINA

MATHEMATICAL MODEL OF THE RATIONAL MAINTENANCE SYSTEM OF RAILWAY TRANSPORT TECHNICAL OBJECTS

Purpose. Develop a mathematical model of a rational maintenance system for the tractive rolling stock, which takes into account the optimization of three indicators: financial resources and time spent on repairs, as well as consumption of environmental resources during repairs. **Methodology.** Modern researches of the organization of locomotives maintenance and repair system are analyzed. Vector optimization of three indicators is used as a mathematical tool for determining the rational maintenance system. The conditions for the solution existence of the problem are formulated. Properties that a rational locomotive content system should possess are described. **Findings.** A mathematical model is proposed that allows choosing the locomotive maintenance and repair system that will meet the optimality conditions for the parameters: repair cost, repair time, environmental resources costs. **Originality.** A new, integrated approach is proposed for the selection of a tractive rolling stock rational maintenance system. This approach allows us to solve not one problem in the construction of an optimal system of maintenance and repair, but to build a rational maintenance system for three indicators. The first indicator takes into account the cost of financial resources for the maintenance of traction rolling stock for the entire life cycle. The second indicator optimizes the time spent on repairs and technical inspections. The third indicator allows to take into account the costs of environmental resources (water, fuel, electricity, etc.) by the locomotive maintenance system. **Practical value.** Implementation of the proposed mathematical model will reduce operational costs for maintenance and repair of the locomotive. This model allows to optimize the total costs of the maintenance system for repairs and replacement of locomotive parts, the total time spent on repairs and the costs of natural resources. It is advisable to use the proposed mathematical model in developing such a locomotive content system that will reduce the negative impact on the environment during the operation of traction rolling stock.

Keywords: maintenance system, locomotive, repair, mathematical modeling, vector optimization, ecology.