

# Оптимізація транспортних систем

УДК 629.429.3:621.313

О.М. Петренко<sup>1</sup>, Б.Г. Любарський<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОВОЗА

*В статті розроблено методику оптимізації режимів роботи мотор-вентилятора тягового асинхронного двигуна електровозу, що рухається ділянкою колії, яка основана на вирішенні задачі умовної мінімізації за критерієм економічної ефективності системи охолодження методом Вейля за узагальненим золотим перетином.*

**Ключові слова:** електровоз, критерій оптимізації, параметри оптимізації, тяговий асинхронний двигун, кількість пар полюсів двигуна мотор-вентилятора.

### Вступ

Для охолодження асинхронних тягових двигунів (АТД) зі ступенем захисту IP23 та IP23, які застосовуються для сучасних локомотивів використовуються примусова вентиляція тягових двигунів до якої входить мотор-вентилятор, що встановлений у кузові локомотива та забезпечує постійний потік повітря охолоджує тяговий двигуна. Привод мотор вентилятора здійснюється за рахунок асинхронного двигуна потужність якого складає близько 10..30 кВт.

**Аналіз останніх досліджень.** Режим роботи тягового приводу тепловозу залежать від комплексу таких факторів: ваги потягу; профілю шляху, графіку руху, кліматичних явищ (швидкості вітру, опадів та інші), режимів роботи системи керування тяговим приводом, системи електропостачання та інші [1 – 6]. процеси нагріву та охолодження у тягових двигунах характеризуються великими значеннями постійної часу, що може становити 10..30 хв. [1 – 6], а нагрів двигуна до постійної температури може тривати 35...100 хв. [1 – 6]. Однак тяговий привод може змінювати свої режими роботи кілька разів за одну хвилину, що обумовлює більшу динамічність електромеханічні процеси у рухомому складі. Таким чином для визначення теплового стану елементів конструкції тягових двигунів необхідно врахувати весь цикл роботи [1, 2] тягового приводу.

Оптимізація параметрів режимів роботи мотор-вентилятора АТД є актуальною науково-технічною задачею для залізничного транспорту, яку можливо вирішити на основі застосування методів оптимізації, як режимів роботи тягового приводу з АТД, так і локомотиву на ділянці колії за оптимальною траєкторією руху, а також з викорис-

танням системи охолодження АТД з оптимальними режимами роботи та параметрами.

В роботах [1, 7 – 12] розглянуто наступні шляхи вирішення задачі. Перший шлях є підвищення системи охолодження та створення оптимальних за геометрією вентиляторів тягових двигунів. Другий – застосування режимів роботи АТД на електрорухомому складі (ЕРС), що рухається з різною швидкістю та при різних навантаженнях, значно знижують загальний ККД електрорухомого складу [1, 7 – 12]. Визначення оптимальних за енергоспоживанням режимів руху дозволяє підвищити ефективність системи охолодження тягових двигунів [7, 8].

**Мета статті:** розробка методики оптимізації режимів роботи мотор-вентилятора асинхронного тягового двигуна локомотиву.

### Результати досліджень

Для вирішення поставленої мети запропоновано застосування методів умовної оптимізації режимів роботи системи охолодження та вентиляції АТД локомотиву.

В якості критерію у дослідженні було обрано критерій економічної ефективності  $k_{e, e}$ , в зв'язку з тим що основні витратами при роботі ЕРС є витрати на його експлуатацію, що пов'язано з досить тривалим строком життєвого циклу транспортних засобів (від 10 до 50 років.), який визначається за виразом [13,14]:

$$k_{e, e} = Q_{\text{охол}} / (n_{\text{тд}} Q_a), \quad (1)$$

де  $n_{\text{тд}}$  – кількість тягових двигунів, що охолоджуються за одним мотор вентилятором,  $Q_{\text{охол}}$  – витрати енергії на охолодження;  $Q_a$  – втрати енергії в активних частинах АТД.

В більшості конструкцій сучасного рухомого складу для приводу мотор-вентиляторів охолодження тягових двигунів використовуються асинх-

ронні двигуни, що живляться від некерованих джерел напруги та не мають регулювання частоти обертання. Регулювання режимів роботи здійснюється завдяки дискретному включення мотор-вентилятора з урахуванням температури в елементах конструкції тягових двигунів. Потужність асинхронних двигунів приводу мотор-вентилятора обумовлюється частотою обертання колеса вентилятора та конструкцією системи вентиляції. [15] В зв'язку з тим, що остання залежить від конструктивних та компонованих рішень при створення усього локомотиву параметрами для вирішення задачі оптимізації режимів роботи систем охолодження АТД обрані наступні величини [15]:

– найбільше перегрівання над температурою охолоджувального середовища в елементах конструкції АТД, при якій включається мотор-вентилятори охолодження тягових двигунів ( $t_{отк}$ );

– число пар полюсів асинхронного двигуна приводу мотор-вентилятора ( $p$ ), що є безрозмірною величиною та обумовлює частоту обертання колеса мотор-вентилятора.

Обмеження, що накладаються при вирішенні задачі оптимізації режимів роботи системи охолодження та вентиляції можливо розділити на такі групи [15]:

– обмеження у вигляді нерівностей, що накладаються на параметри оптимізації [15]:

$$0 < t_{отк} < t_{доп}; \quad (2)$$

$$1 < p < 14, \quad (3)$$

де  $t_{доп}$  – максимально допустиме перегрівання над температурою охолоджувального середовища для елементів конструкції тягового двигуна, що обумовлено вимогами до класу ізоляції та максимальними температурами до них;

– обмеження, що накладаються на максимальний перегрів над температурою охолоджувального середовища елементів конструкції тягових двигунів, що виникає при русі локомотиву з составом на ділянці колії с заданим профілем та графіком руху [15]:

$$u_{max} < u_{доп}, \quad (4)$$

де  $u_{max}$ ,  $u_{доп}$  – вектори стовбці перегрівань елементів АТД та допустимих значень цих перегрівань.

Рішення задачі оптимізації проводиться на прикладі перспективного вантажного електровозу розробленого на базі вантажного тепловозу 2ТЕ25А параметри тягового приводу якого наведені в табл. 1 при русі з составом з 60 чотирьохвісними вагонами загальною масою 3600 тон в режимі підтримання середньої швидкості в 20км/год. Основні технічні характеристики тягових приводів приведені та результати визначення оптимальних траєкторій руху трамваю приведено у роботі [15]. Далі визначити втрати у елементах АТД локомотиву на підставі методики, що наведена у роботах [15] результати яких наведено на рис. 1.

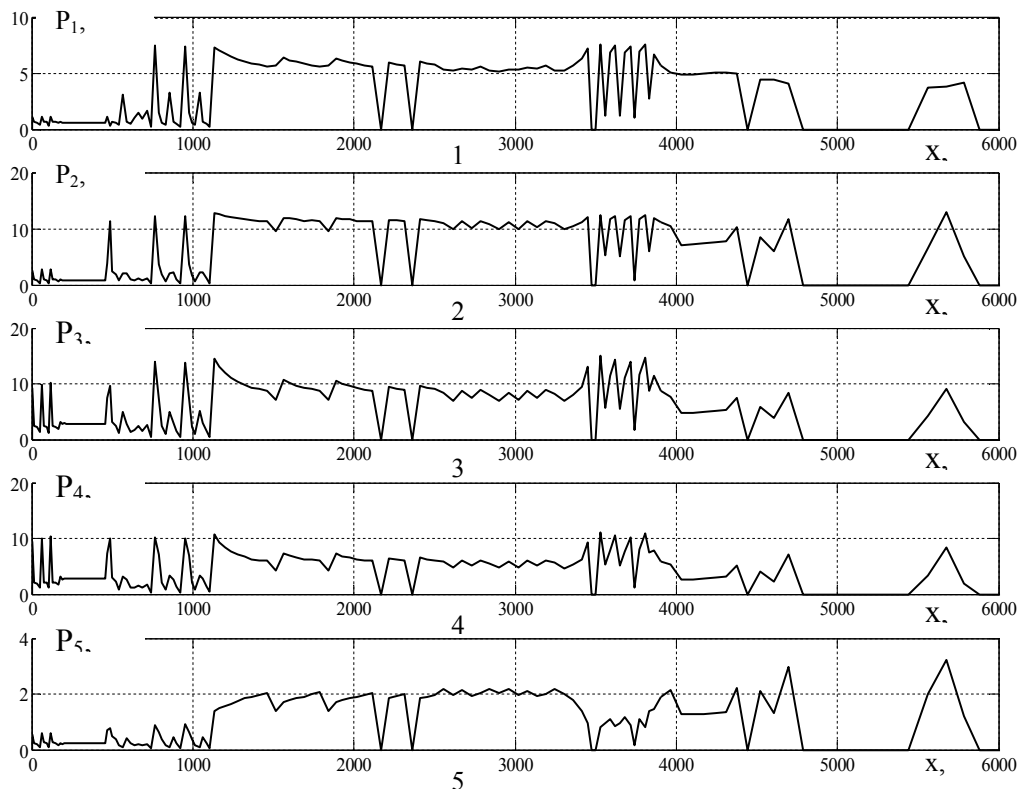


Рис. 1. Втрати у тяговим двигуном: 1 – втрати у сталі статора  $P_1$ ; Вт; 2 – втрати у роторі  $P_2$ ; Вт; 3 – пазової частині обмотки статора  $P_3$ ; Вт; 4 – лобовій частині обмотки статора  $P_4$ ; Вт; 5 – механічні втрати  $P_5$ , Вт

За результатами цих залежностей визначаємо витрати енергії в активних частинах АТД можливо визначити за виразом

$$Q_a = \sum_{n=1}^5 \int_T P_n, \quad (5)$$

де  $P_1$  – втрати у сталі статора;  $P_2$  – втрати у роторі;  $P_3$  – втрати у пазу обмотки статора,  $P_4$  – лобовій частині обмотки статора,  $P_5$  – механічні втрати.

Ці результати є вхідними даними для вирішення задачі аналізу яка базується на методиці моделювання теплових режимів яка наведена в роботах [10 – 12]. Відповідно до цієї методики пропонується застосування універсальної еквівалентної теплової схеми, що дозволяє виконувати теплові розрахунки нестационарних режимів роботи АТД за різних систем охолодження. В роботах [10 – 12, 16] розглянуто використання універсальної теплової схеми для теплових розрахунків асинхронних двигунів регульованих електроприводів для двигунів зі ступенем захисту IP23, IP22 до яких належить АД 917. Для розрахунку еквівалентної теплової схеми пропонується використати метод вузлових потенціалів для електричних кіл.

На його підставі для запропонованої універсальної еквівалентної теплової схеми може бути складена система диференціальних рівнянь теплового балансу. Величини потужностей тепловиділення розраховуються за втратами в елементах АТД, які змінюються за часом, в залежності від режиму роботи тягового приводу, що наведені на рис. 1 та в роботі [15] Також змінюються і провідності схеми заміщення в залежності від потоку повітря, що створює мотор-вентилятор та залежать від параметрів які прийняті для вирішення задачі аналізу.

Для визначення обмеження проводиться аналіз змін перегрівань елементів АТД за весь час моделювання теплових режимів за виразом

$$u_{\max} = \text{MAX}(u). \quad (6)$$

Втрати потужності на охолодження знаходяться за виразом [17,18]

$$Q_{\text{вен}} = \int_T \frac{\Delta p Q_v}{\eta_v} dt, \quad (7)$$

де  $\Delta p$  – тиск повітря в вентиляторі,  $Q_v$  – потік повітря у вентиляторі,  $\eta_v$  – ККД вентилятора, які визначаються за результатами вентиляційного розрахунку за методикою наведеною в [17, 18] та залежать від геометрії вентилятора та частоти його обертання,  $T$  – інтервал часу руху ЕРС.

Результатом вирішення задачі аналізу є знаходження критерію оптимізації за виразом (1).

За результатами вирішення тестових задач оптимізації режимів роботи мотор-вентилятора АТД найкращий результат показав метод Вейля за уза-

гальним золотим перетином.

Хід вирішення задачі наведено на рис. 2 (ромбом позначена оптимальна точка, круг – стартова.).

Отримані такі оптимальні значення  $t_{\text{отк}} = 64,1$  °С, а кількість пар полюсів – 5. Розрахункова частота обертання мотор-вентилятора становить 570 об/хв. Потрібна потужність мотор-вентилятора складає 370 Вт, що значно менше за потужність базового мотор-вентилятор, що складає 22 кВт та має частоту обертання 2950 об/хв. Критерій оптимальності у розглянутій задачі становив значення 0,03.

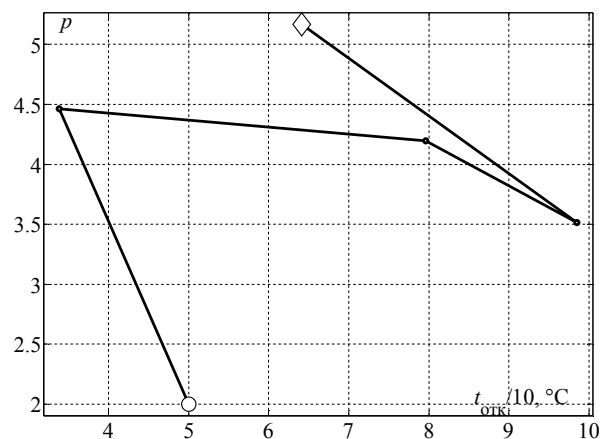


Рис. 3. Хід вирішення задачі оптимізації

## Висновки

Розроблено методику оптимізації режимів роботи мотор-вентилятора тягового асинхронного двигуна локомотива, що рухається на ділянці колії с заданим профілем та графіком, особливості якої є такі:

- методика основана на вирішенні задачі умовної мінімізації за критерієм економічної ефективності системи охолодження методом Вейля за узагальненим золотим перетином;

- в якості параметрів оптимізації обрані наступні величини: температура обмоток тягового двигуна при якій проходить включення мотор-вентилятора та кількість пар полюсів двигуна мотор-вентилятора, також встановлені обмеження у вигляді нерівностей;

- задача аналізу системи вентиляції та охолодження тягових двигунів основана на моделюванні теплових режимів АТД за узагальненою еквівалентною тепловою схемою.

Для тестової задачі оптимізації керування системою вентиляції та охолодження, на прикладі перспективного вантажного електровозу, розробленого на базі вантажного тепловозу 2ТЕ25А, при русі з составом із 60 чотирьохвісних вагонів загальною масою 3600 тон в режимі підтримання середньої швидкості в 20 км/год, отримані такі оптимальні значення для мотор-вентилятору:

- температура включення – 64,1 °С;
- кількість пар полюсів двигуна – 5;

розрахункова частота обертання – 570 об/хв.;  
 потрібна потужність складає 370 Вт, що значно менше за потужність базового мотор-вентилятора, що складає 22 кВт та має частоту обертання 2950 об/хв.

Критерій оптимальності у розглянутій задачі становив значення 0,03.

### Список літератури

1. Любарський Б.Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. – Дисертація ... доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. – «Електротранспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2014. 368 с.
2. Гетьман Г.К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта [Текст]: монография / Г.К. Гетьман. – Д.: Изд. Днепр. нац. ун-та ж/д трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.
3. Мокін О.Б. Моделювання та оптимізація руху багатомасових електричних транспортних засобів поверхнями зі складним рельєфом: монографія / О.Б. Мокін, Б. І. Мокін. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 192 с.
4. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Х.: Изд. центр "НТМТ", 2013. – 248 с.
5. Петренко О.М. Визначення ефективності електрорухомого складу. Основні положення та підходи / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 6. – С. 8-13.
6. Todorov, Emanuel. "Optimal control theory." Bayesian brain: probabilistic approaches to neural coding (2006): 269-298.
7. Kappen, Hilbert J. "Optimal control theory and the linear bellman equation." Inference and Learning in Dynamic Models (2011): 363-387.
8. Петренко О.М. Алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський, М.Л. Глебова // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип.: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ "ХПІ", 2016. – № 6 (1178). – С. 89-95.
9. Петренко О.М. Методика оптимізації режимів роботи асинхронного тягового приводу рухомого складу/ О.М. Петренко, І.В. Доманський, Б.Г. Любарський // Механіка та машинобудування. – 2016. – №1. – С. 59-67
10. Петренко О. М. Алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський, М.Л. Глебова // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – № 6 (1178). – С. 89-95.
11. Петренко О.М. Математична модель оптимального керування рухом електрорухомого складу на підставі вирішення рівнянь Гамільтона-Якобі-Беллмана/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2016. – № 2. – С. 19-24
12. Петренко О.М. Методика оптимізації режимів роботи асинхронного тягового приводу рухомого складу/ О.М. Петренко, І.В. Доманський, Б.Г. Любарський // Механіка та машинобудування. – 2016. – №1. – С. 59-67
13. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
14. Борисенко А.И. Охлаждение промышленных электрических машин / А.И. Борисенко, О.Н. Костиков, А.И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
15. Петренко О.М. Оптимізація керування мотор-вентилятором охолодження тягових двигунів вантажного локомотива з асинхронним тяговим приводом при русі на ділянці з заданим профілем та графіком руху / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2017. – № 2. – С. 9-15.
16. Петрушин В.С. Расчет температур конструктивных элементов асинхронных двигателей в динамических режимах/ В.С. Петрушин, С.В. Рябинин, А.М. Якимец // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», – 2000. – № 403. – С. 145 – 149.
17. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах./ И.Ф. Филиппов. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 256 с.
18. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.

Надійшла до редколегії 25.10.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Т. Доманський, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОХЛАЖДЕНИЕ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗА

А.Н. Петренко, Б.Г. Любарський

В статье разработана методика оптимизации режимов работы мотор-вентилятора тягового асинхронного двигателя электровоза, который движется по участку пути, основанная на решении задачи условной минимизации по критерию экономической эффективности системы охлаждения методом Вейля по обобщенным золотым сечением.

**Ключевые слова:** электровоз, критерий оптимизации, параметры оптимизации, тяговый асинхронный двигатель, число пар полюсов двигателя мотор-вентилятора.

### OPTIMIZATION OF OPERATING MODES COOLING OF TRACTION ENGINE ELECTRICS

O.M. Petrenko, B.G. Liubarskyi

The article describes a technique for optimizing the operating modes of the motor-fan of a traction asynchronous electric locomotive engine that moves along a section of the track based on solving the problem of conditional minimization by the criterion of the economic efficiency of the cooling system by the Weyl method over the generalized golden section.

**Keywords:** electric locomotive, optimization criterion, optimization parameters, traction asynchronous motor, number of pole pairs of the motor-fan motor.