

УДК 629.429.3:621.313

О.М. Петренко

Харківський університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВЕНТИЛЯТОРА АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ТРАМВАЙНОГО ВАГОНУ

В статті розроблено методику оптимізації параметрів вентилятора тягового асинхронного двигуна трамвайного вагону, що рухається на ділянці колії з заданим профілем та графіком, яка основана на вирішенні задачі умовної мінімізації за критерієм економічної ефективності системи охолодження методом Вейля за узагальненим золотим перетином.

Ключові слова: трамвайний вагон, критерій оптимізації, параметри оптимізації, тяговий асинхронний двигун, еквівалентна теплова схема заміщення, рух на ділянці колії, перегрівання над температурою охолоджувального середовища.

Вступ

Для охолодження асинхронних тягових двигунів (АТД) зі ступенем захисту IP44 та IP54, які застосовуються для сучасних трамвайних вагонів використовуються двоконтурна система самовентиляції до якої входить вентилятор, що безпосередньо встановлений на свобідному кінці валу двигуна та забезпечує потік повітря який охолоджує станину двигуна, а також внутрішній вентилятор, що забезпечує внутрішню циркуляцію внутрішнього повітря. Загальна потужність цих систем становить близько 0,1-1,5% від часової потужності двигуна.

Аналіз останніх досліджень. Режими роботи тягового приводу трамваю залежать від комплексу факторів таких як: 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]. Теплові процеси у тягових двигунах характеризуються великими значеннями постійної часу, що може становити 10..30 хв. [1-6]. Нагрів двигуна до постійної температури може тривати 35...100 хв. [1-6]. Однак електромеханічні процеси при русі електрорухомого складу більш динамічні. Режим роботи тягового приводу може змінюватися кілька разів за одну хвилину. Тому для визначення теплового стану тягового двигуна необхідно врахування теплового навантаження за весь час роботи [1,2]. В зв'язку з тим, що при роботі тягового приводу поширені режими вибігу та механічного (пневматичного) гальмування при яких перетворення енергії у тяговому двигуні не відбувається і він перебуває в процесі охолодження, максимальна температура тягового двигуна може бути значно нижче за температуру, що встановилася, та вимагати значно менш потужнішої системи охолодження.

Таким чином оптимізація параметрів вентилятора АТД є актуальною науково-технічною зада-

чею для міського електротранспорту, яку можливо вирішити на основі застосування методів оптимізації, як режимів роботи тягового приводу з АТД, так і трамвайного вагону на ділянці колії за оптимальною траєкторією руху, а також з використанням системи охолодження АТД з оптимальними геометричними параметрами.

Для вирішення цієї проблеми можливі наступні шляхи [1, 7-12]. Перший, застосування режимів роботи АТД на електрорухомому складі (ЕРС), який 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 [1, 7-12]. Другим шляхом є підвищення системи охолодження та створення оптимальних за геометрією вентиляторів тягових двигунів. В роботі розглядається оптимізація лише зовнішнього вентилятора тому, як внутрішній вентилятор двигуна є складовою частиною коротко замикаючих кілець ротору і виконує подвійну функцію.

Мета статті: розробка методики оптимізації оптимізація параметрів вентилятора асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону.

Результати досліджень

Для вирішення поставленої мети запропоновано застосування методів умовної оптимізації параметрів системи охолодження та вентиляції АТД трамвайного вагона.

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]:

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

де $Q_{\text{охол}}$ — витрати енергії на охолодження, Q_a — втрати енергії в активних частинах АТД.

$$u_{\text{max}} < u_{\text{доп}}, \quad (4)$$

Ефективність роботи вентилятора охолодження обумовлюється його розмірами тобто: зовнішній діаметр (D_1) та ширина лопатки (b_1), які можливо обрати у якості параметрів. Усі інші розміри можливо залишити такими як у базовій конструкції двигуна. Обмеження, що накладаються при вирішенні задачі оптимізації параметрів системи охолодження та вентиляції можливо розділити на такі групи.

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

1. Обмеження у вигляді нерівностей, що накладаються на параметри оптимізації:

$$b_{\text{min}} < b_1 < b_{\text{max}}, \quad (2)$$

$$D_{\text{min}} < D_1 < D_{\text{max}}, \quad (3)$$

Рішення задачі оптимізації проводиться на прикладі руху трамвайного вагона Т-3ВПА з тяговим двигуном АД931 на ділянках колії від трамвайного депо «Салтівське» до розворотного коло 602 мр/н м. Харків та в зворотному, що повторюється чотири рази.

де b_{min} , b_{max} — мінімальний та максимальна допустимий розмір лопатки вентилятора, D_{min} , D_{max} — мінімальний та максимальна допустимий розмір лопатки вентилятора. Ці параметри обумовлені конструкцією АТД.

Основні технічні характеристики тягових приводів приведені та результати визначення оптимальних траєкторій руху трамваю приведено у роботі [15].

Далі визначити втрати у елементах АТД трамваю на підставі методики, що наведена у роботах [10-12, 16] результати яких наведено на рис. 1.

2. 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

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.

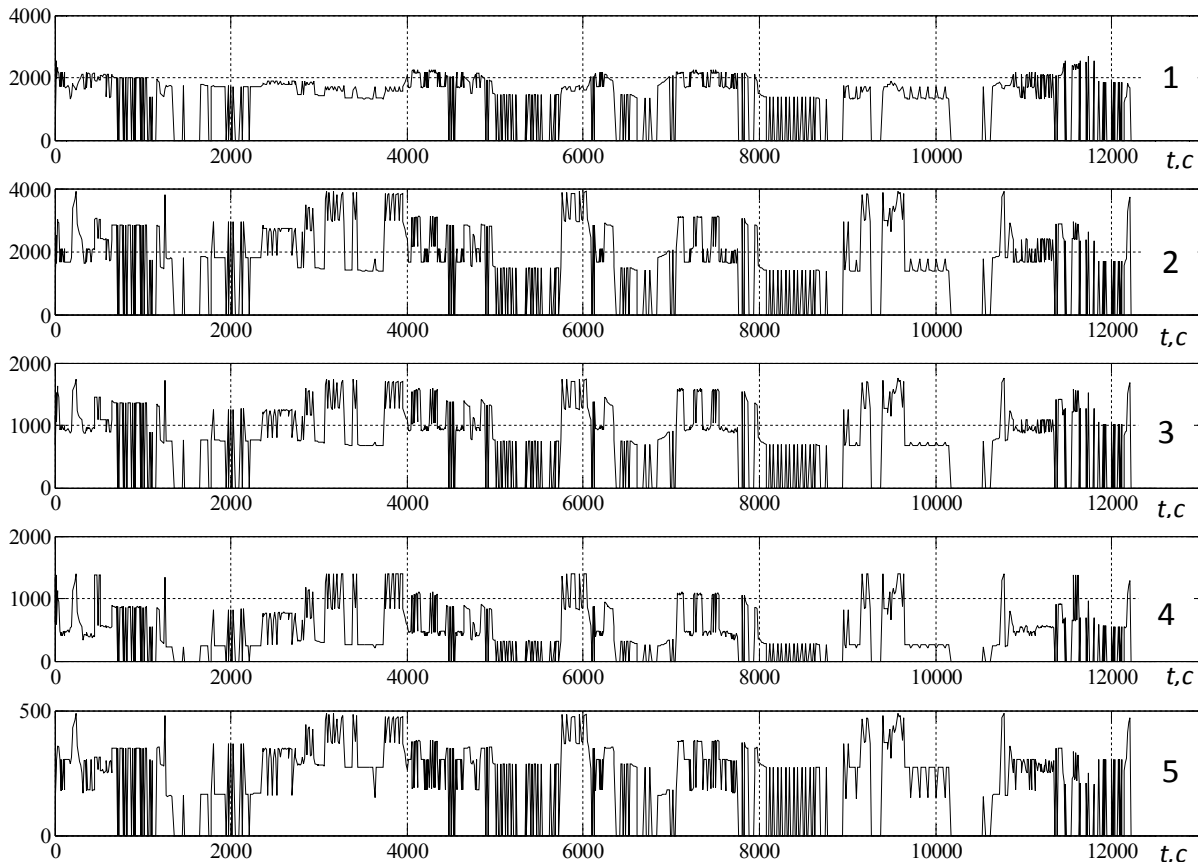


Рис. 1. Втрати у тяговим двигуном: 1 – втрати у сталі статора P_1 , Вт; 2 – втрати у роторі P_2 , Вт, 3 –пазової частині обмотки статора P_3 , Вт, 4 – лобовій частині обмотки статора P_4 , Вт, 5 – механічні втрати P_5 , Вт

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 IP44, IP54 до яких належить АД 931. Його еквівалентна теплова схема зображена на рис.2. Для розрахунку еквівалентної теплової схеми пропонується використати метод вузлових потенціалів для електричних кіл.

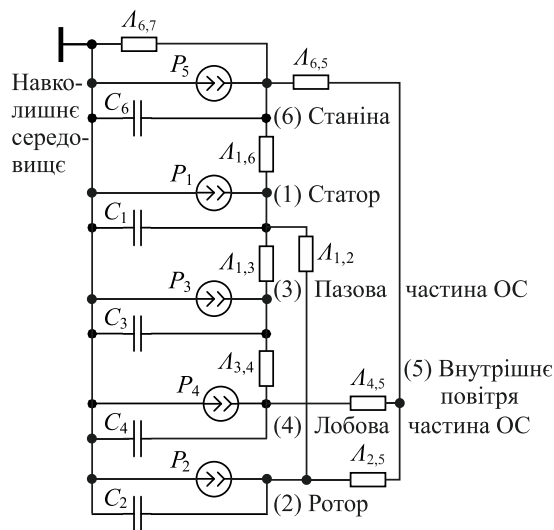


Рис. 2. Еквівалентна теплова схема для АТД з ступенем захисту IP44, IP54

На його підставі для запропонованої універсальної еквівалентної теплової схеми може бути складена система диференціальних рівнянь теплового балансу.

У матричному виді система представляється системою рівнянь:

$$\frac{d}{dt} u = [C]^{-1} \cdot [DP + L \times u], \quad (6)$$

де u – матриці-стовпці середніх перегрівань над температурою охолоджувального середовища у відповідних конструктивних елементах електричної машини, C – матриця теплоємностей відповідних конструктивних елементів, на які умовно розбивається АТД, DP – матриця-стовпець потужностей тепловиділення у відповідних конструктивних елементах АТД, L – матриця теплових провідностей.

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 вентилятор та залежать від параметрів які прийняті для вирішення задачі аналізу.

Для визначення обмеження (4) проводиться аналіз змін перегрівань елементів АТД за весь час моделювання теплових режимів за виразом

$$u_{\max} = \text{MAX}(u). \quad (7)$$

Потужність, що втрачається при роботі вентилятора визначається за виразом [17, 18]

$$P_{\text{вен}} = \frac{\Delta p Q_v}{\eta_v}, \quad (8)$$

де Δp – тиск повітря в вентиляторі, Q_v – потік повітря у вентиляторі, η_v – ККД вентилятора, які визначаються за результатами вентиляційного розрахунку за методикою наведеною в [17,18] та залежать від геометрії вентилятора та частоти його обертання.

Втрати потужності на охолодження знаходяться за виразом

$$Q_{\text{вен}} = \int_T P_{\text{вен}}, \quad (9)$$

де T – інтервал часу руху ЕРС.

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

За результатами вирішення тестових задач оптимізації параметрів вентилятора АТД найкращий результат показав метод Вейля за узагальненим золотим перетином.

Хід вирішення задачі наведено на рис. 3 (ромбом позначена оптимальна точка, круг – стартова.).

Отримані наступні оптимальні значення зовнішній діаметр вентилятора $D_1 = 308,2$ мм, а ширина лопатки вентилятора $b_1 = 15,7$ мм.

Критерій оптимальності у розглянутій задачі становив значення 0,0408. Порівняно з базовою конструкцією він знизився на 27,6%. (0,052).

Результати моделювання теплових режимів АТД при оптимальних значеннях параметрів вентилятора приведені на рис. 4.

Як видно з графіків найбільше перегрівання має лобова частина обмотки статора АТД, що складає $139,6$ °C на 3363с з початку руху і не перевищує допустиме значення у 140 °C.

Висновки

Розроблено методику оптимізації параметрів вентилятора тягового асинхронного двигуна, що рухається на ділянці колії с заданим профілем та графіком особливості якої є наступне:

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

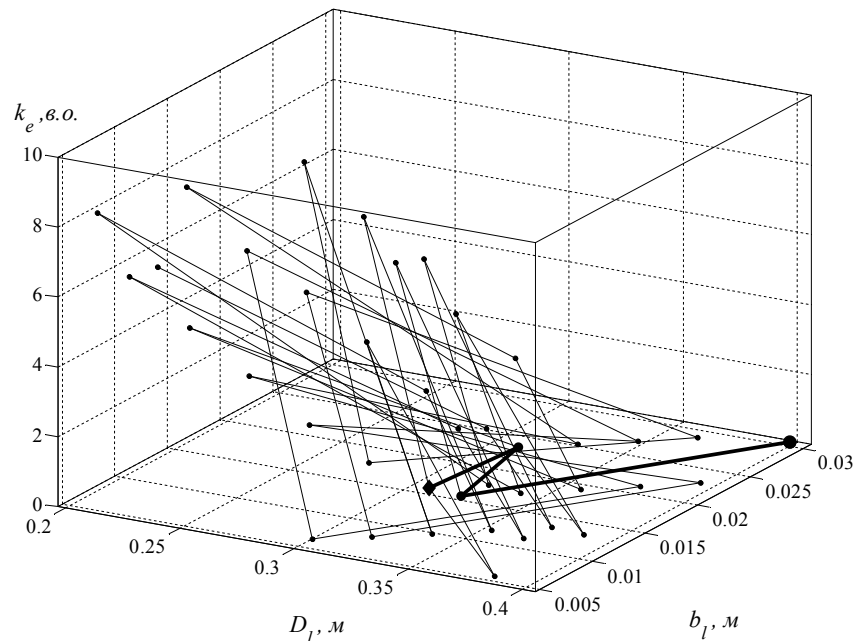


Рис. 3. Хід вирішення задачі мінімізації

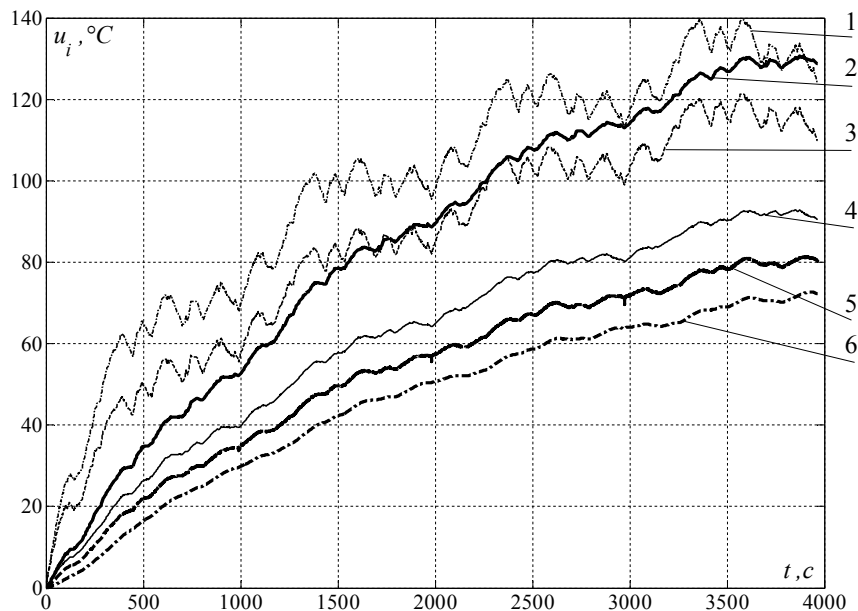


Рис. 4. Результати моделювання теплового стану тягового двигуна АД931 встановленого у трамвайному вагоні Т-ЗВПА, який рухається на ділянках колії від трамвайного депо «Салтівське» до розворотного коло 602 мр/н м. Харків та в зворотному напрямі, що повторювався чотири рази. Залежності перегрівань над температурою охолоджувального середовища °С від часу: 1 – лобової частини обмотки статора, 2 – ротору; 3 – пазової частини обмотки статора; 4 – осердя статора, 5 – внутрішнє повітря, 6 – станини

– в якості параметрів оптимізації обрані наступні величини: зовнішній діаметр та ширина лопатки;

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

Вирішення тестової задачі проведено на прикладі тягового двигуна АД931 встановленого у трамвайному вагоні Т-ЗВПА, який рухається на ділянках колії від трамвайного депо «Салтівське» до розворотного коло 602 мр/н м. Харків та в зворотному напрямі,

що повторювався чотири рази отримані такі оптимальні значення:

- діаметр вентилятора $D_l = 308,2$ мм,
- ширина лопатки вентилятора $b_l = 15,7$ мм,
- критерій оптимальності у розглянутій задачі становив значення 0,0408.

Встановлено, що порівняно з базовою конструкцією критерій ефективності знизився на 27,6% (0,052).

За результатами моделювання АТД з оптимальним вентилятором встановлено, що найбільше пере-

грівання має лобова частина обмотки статора АТД, що складає 139,6 °С на 336с з початку руху і не перевищує допустиме значення у 140 °С.

Список літератури

1. Любарський Б.Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. – Дисертація на здобуття наукового ступеня 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– Харків : 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" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Математичне моделювання в техніці та технологіях– 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 режимів руху трамвайного вагону з асинхронними тяговими двигунами на ділянці колії з встановленим графіком руху та профілем / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2016. – № 4(40). – С. 36-40.
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.: Выси. шк., 1989. – 239 с.

Надійшла до редколегії 18.12.2016

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕНТИЛЯТОРА АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНА

А.Н. Петренко

В статье разработана методика оптимизации параметров вентилятора тягового асинхронного двигателя трамвайного вагона, движущегося на участке пути с заданным профилем и графиком, основанная на решении задачи условной минимизации по критерию экономической эффективности системы охлаждения методом Вейля по обобщенному золотому сечению.

Ключевые слова: трамвайный вагон, критерий оптимизации, параметры оптимизации, тяговый асинхронный двигатель, эквивалентная тепловая схема замещения, движение на участке пути, превышение температуры над температурой охлаждающей среды.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE FAN OF THE ASYNCHRONOUS TRACTION ENGINE OF A TRAM WAGON

O.M. Petrenko

In the article the technique of optimization of the fan parameters of a traction asynchronous motor of a tram car moving on a section of a path with a given profile and schedule is developed 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: Tram car, optimization criterion, optimization parameters, traction asynchronous motor, equivalent thermal replacement circuit, movement on the section of the track, excess of temperature above the temperature of the cooling medium.