

О. М. ПЕТРЕНКО, Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ТЯГОВОМУ АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ ВАНТАЖНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ ПРИ РУСІ НА ДІЛЯНЦІ КОЛІЇ С ЗАДАНИМ ПРОФІЛЕМ ТА ГРАФІКОМ РУХУ

Розроблено методику моделювання теплових процесів у тяговому асинхронному двигуні на прикладі його застосування у вантажному електровозі при русі на ділянці колії з заданим профілем та графіком руху. Особливістю цієї методики є розрахунок теплових режимів двигуна, здійснюється на основі еквівалентної теплової схеми заміщення з використанням методу вузлових потенціалів для електричних кіл. На їх підставі для запропонованої універсальної еквівалентної теплової схеми заміщення складена система диференціальних рівнянь теплового балансу.

Ключові слова: тяговий асинхронний двигун, вантажний електровоз, еквівалентна тепла схема заміщення, рух на ділянці колії, перегрівання над температурою охолоджувального середовища.

В работе разработана методика моделирования тепловых процессов в тяговом асинхронном двигателе на примере его применения в грузовом электровозе при движении на участке пути с заданным профилем и графиком движения. Особенностью этой методики является расчет тепловых режимов двигателя, осуществляемый на основе эквивалентной тепловой схема замещения с использованием метода узловых потенциалов для электрических цепей. На их основании для предложенной универсальной эквивалентной тепловой схемы замещения составлена система дифференциальных уравнений теплового баланса.

Ключевые слова: тяговый асинхронный двигатель, грузовой электровоз, эквивалентная тепловая схема замещения, движение на участке пути, превышение температурой над температурой охлаждающей среды.

In the work a technique of modeling thermal processes in the traction asynchronous engine by an example of its application in a cargo electric locomotive moving on a section of a track with the set profile and schedule of movement is developed. A feature of this technique is calculation of the thermal conditions of the engine carried out on the basis of an equivalent thermal replacement circuit using the method of nodal potentials for electrical circuits. On their basis a system of differential equations of the heat balance is compiled for the proposed universal equivalent thermal substitution scheme. Based on the results of the simulation, the following is established: the frontal part of the stator winding has the maximum temperature rise, and the movement of the freight train in question along the given section of the track and according to the given schedule can be carried out no more than twice, then it is necessary to stop for cooling the engines or apply another schedule.

Key words: traction induction motor, cargo electric locomotive, equivalent thermal replacement scheme, movement on the section of the track, excess of temperature above the temperature of the cooling medium.

Вступ. При роботі тягового приводу електрорухомого складу (ЕРС) поширені режими вибігу та механічного (пневматичного) гальмування, для яких характерна відсутність перетворення енергії у тяговому двигуні та перебування його в процесі охолодження. Максимальна температура тягового двигуна може бути значно нижче за температуру, що встановилася, та вимагати значно менш потужнішої системи охолодження.

Для визначення температури елементів конструкції тягових двигунів необхідно проведення моделювання їх теплового стану при русі електрорухомого складу. В роботі розглядається вирішення цієї задачі для найбільш поширених в наступний час у виробництві асинхронних тягових двигунів (АТД), що встановлені на вантажному електровозі.

Аналіз останніх досліджень. Електромагнітні процеси перетворення енергії у ЕРС, механічні процеси, які зв'язані з рухом потягу на ділянці колії, та теплові процеси у тягових двигунах мають різні швидкості протікання. Так, теплові процеси у тягових двигунах характеризуються значеннями постійної часу, що може становити 10 ... 30 хв. [1 – 6], а нагрів двигуна до постійної температури може тривати 35 ... 100 хв. [1 – 6]. Електромеханічні процеси при русі електрорухомого складу більш динамічні; вони тривають близько 0,1 ... 100с. Режим роботи тягового приводу може змінюватися кілька разів за одну хвилину. Для визначення теплового стану тягового двигуна необхідно врахування теплового навантаження за весь час роботи [1, 2].

Мета роботи: розробити методику моделювання теплових процесів у тяговому асинхронному двигуні на прикладі його застосування у вантажному електровозі при русі на ділянці колії с заданим профілем та графіком руху.

Постановка задачі. За результатами вирішення задачі руху електрорухомого складу на ділянці колії проведено вирішення тягової задачі руху вантажного потягу з 60 вагонами загальною масою 3600 т та електровозом з осявою характеристикою $2x(3_0 - 3_0)$, розробленого на базі тепловозу 2ТЕ 25А із заданим графіком руху. На електровозі встановлені тягові двигуни АД917. Методика визначення кривих руху (рис. 1) наведена у роботах [7 – 9]. За результатами вирішення тягової задачі знайдено втрати в елементах конструкції тягового двигуна, що наведені на рис. 2.

Математична модель. В роботі [10] пропонується універсальна еквівалентна тепла схема, що дозволяє виконувати теплові розрахунки нестационарних режимів роботи АТД за різних систем охолодження. Розглянуто використання універсальної теплової схеми для теплових розрахунків асинхронних двигунів регульованих електроприводів для двигунів зі ступенем захисту IP22, IP23, до яких належить АД 917; вона зображена на рис. 3.

Для розрахунку ЕТС пропонується використати *метод вузлових потенціалів* для електричних кіл.

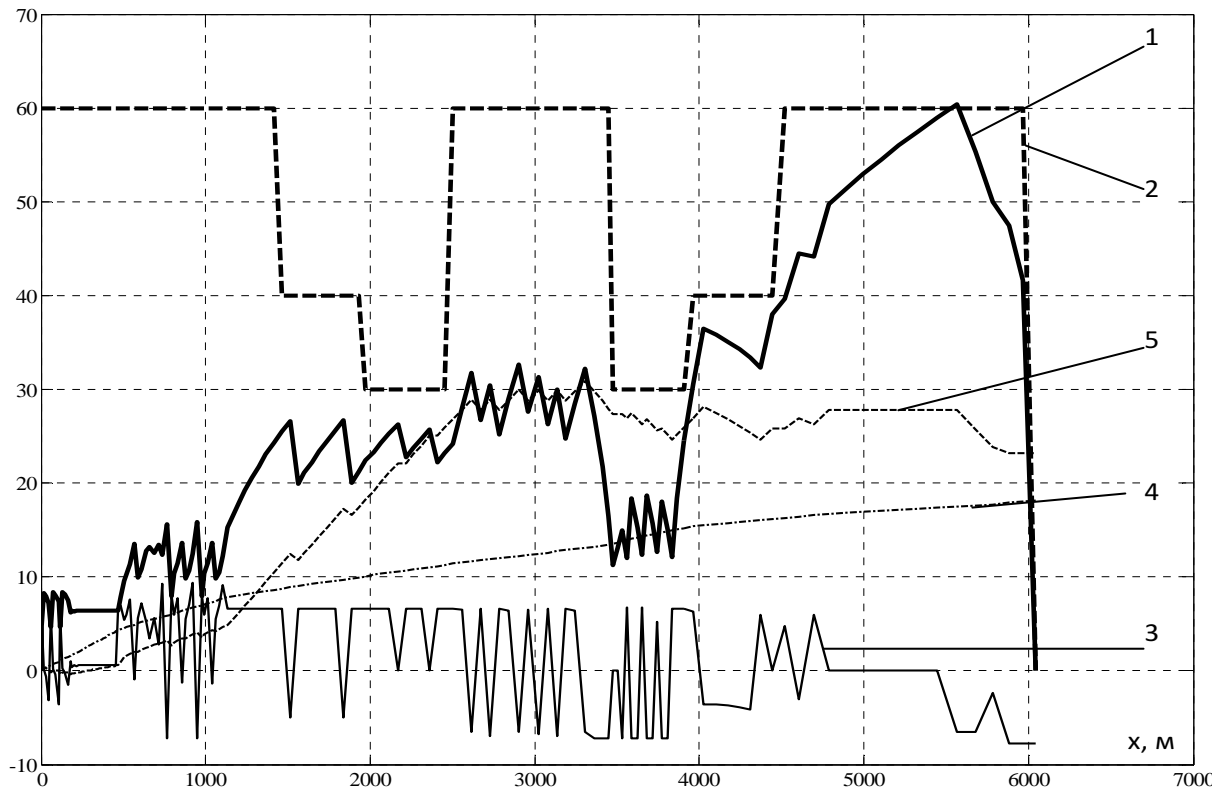


Рис. 1 – Результати вирішення тягової задачі при русі вантажного потягу: 1 – швидкість руху (v), км/год; 2 – обмеження швидкості, км/год; 3 – сила тяги/100, ($F_{tr}/100$) кН; 4 – час руху (t), хв.; 5 – витрати енергії/10 ($E/10$), кВт·год.

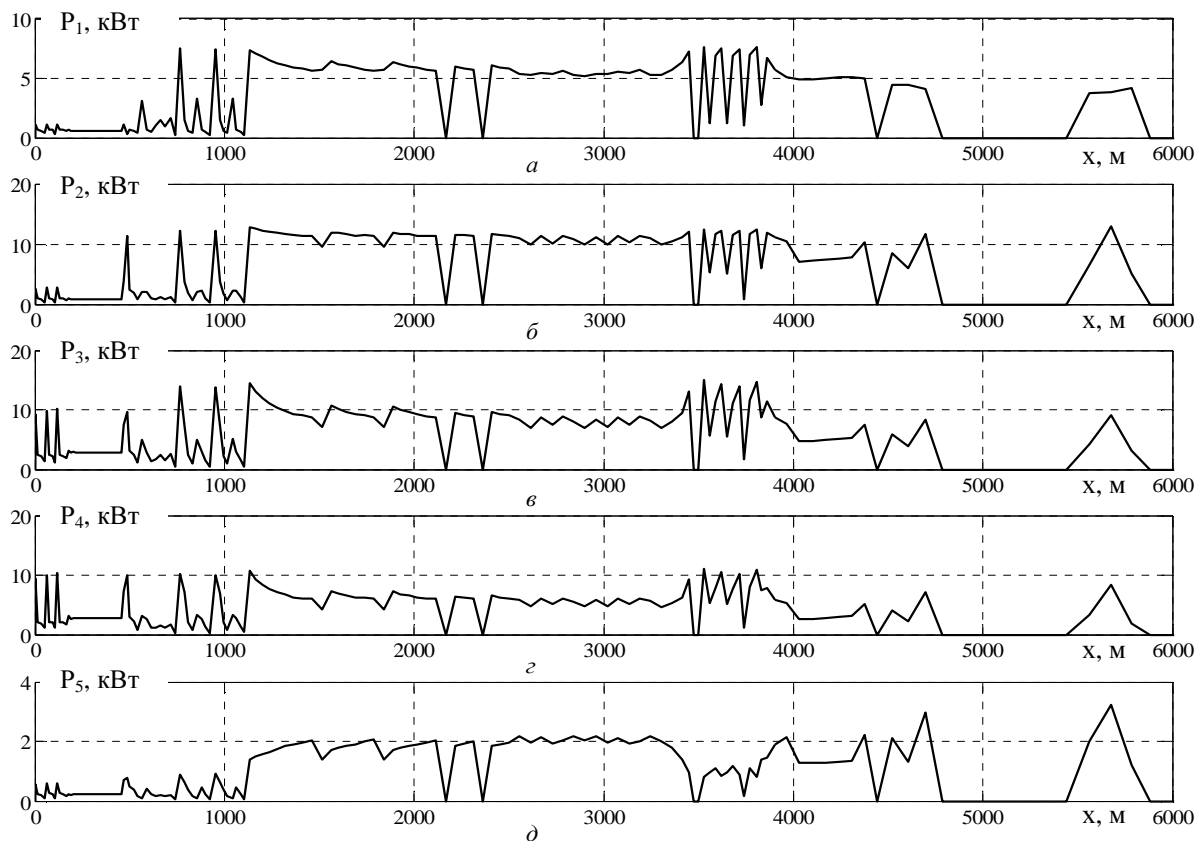


Рис. 2 – Втрати у тяговому двигуні: a – втрати у сталі статора; b – втрати у роторі; $в$ – втрати пазової частини обмотки статора; $г$ – лобовій частині обмотки статора; $д$ – механічні втрати.

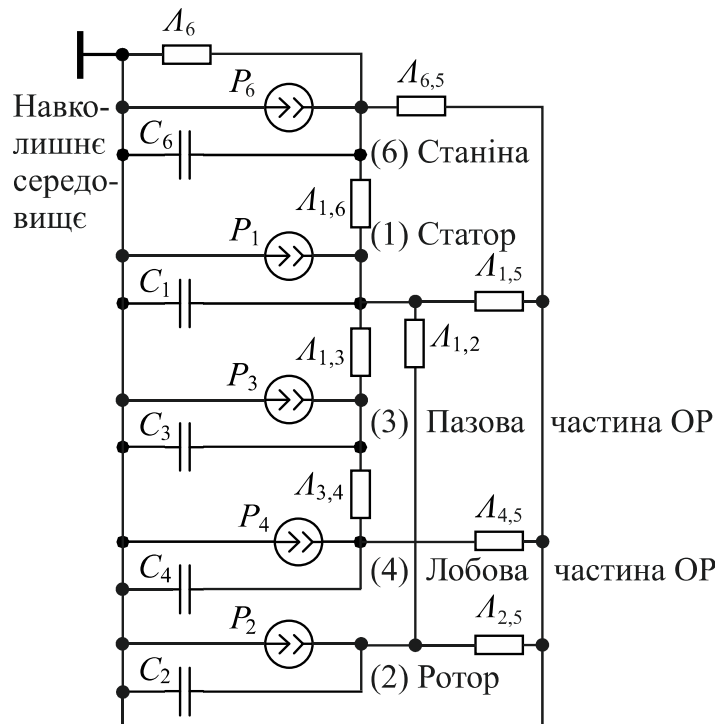


Рис. 3 – ЕТС для АТД з ступенем захисту IP22, IP23.

На його підставі для запропонованої універсальної ЕТС може бути складена система диференціальних рівнянь теплового балансу. У матричному вигляді система представляється виразом:

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

де u – матриці-стовпці середніх перегрівань над температурою охолоджувального середовища у відповідних конструктивних елементах електричної машини,

$$u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T, \tag{2}$$

C – матриця теплоємностей відповідних конструктивних елементів, на які умовно розбивається АТД,

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_n \end{bmatrix}, \tag{3}$$

DP – матриця-стовпець потужностей тепловиділення у відповідних конструктивних елементах АТД,

$$DP = [DP_1, DP_2, \dots, DP_n]^T. \tag{4}$$

Величини потужностей тепловиділення розраховуються при аналізі режимів роботи, що встановилися, або нестационарних, за даними втрат в елементах машини.

L – це матриця теплових провідностей,

$$L = \begin{bmatrix} -L_{1,1} & L_{1,2} & \dots & L_{1,n} \\ L_{2,1} & -L_{2,2} & \dots & L_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n,1} & L_{n,2} & \dots & -L_{n,n} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Матриці потужностей тепловиділення DP та провідностей L складаються на основі метода вузлових потенціалів для електричних кіл:

$$L_{n,n} = \sum_k \Lambda_{k,n}, \tag{6}$$

$$L_{n,m} = L_{m,n} = \Lambda_{n,m}. \tag{7}$$

де $\Lambda_{k,n}$ – теплова провідність між елементами двигуна.

Результати моделювання. Моделювання теплового стану тягового двигуна АД917 вантажного тепловозу на ділянках колії раціонально проводити при 4 циклах руху за зазначеною ділянкою (рис. 4), в зв'язку з тим, що за один цикл руху температура елементів двигуна не досягає максимального значення.



Рис. 4 – Результати моделювання теплового стану тягового двигуна АД917 вантажного електровозу на ділянках колії.

Залежності перегрівань над температурою охолоджувального середовища $^{\circ}\text{C}$ від часу:

- 1 – лобової частини обмотки статора; 2 – пазової частини обмотки статора; 3 – сердечника статора;
4 – ротору; 5 – станіни.

Результати моделювання показують, що максимальне перегрівання над температурою охолоджувального середовища має лобова частина обмотки статора. Так за перший цикл навантаження 991 с вона становить $109,6^{\circ}\text{C}$, за другий – 135°C на 2001 с з початку руху, за третій – $158,5^{\circ}\text{C}$ на 3075 с та за четвертий – $167,2^{\circ}\text{C}$ на 4175 с, відповідно. За перші два цикли руху перегрівання над температурою охолоджувального середовища не досягло допустимого значення для ізоляції, що застосована у АДД – 145°C (клас ізоляції Н). Однак за третій цикл руху перегрівання над температурою охолоджувального середовища стало недопустимим. Таким чином встановлено, що рух розглянутого вантажного потягу за заданою ділянкою колії та графіком можливо проводити не більш ніж два рази, потім потрібно проводити зупинку для охолодження двигунів, або застосовувати інший графік руху.

Висновки. Таким чином, авторами статті розроблена методика моделювання теплових процесів у тяговому асинхронному двигуні на прикладі його застосування у вантажному електровозі при русі на ділянці колії з заданим профілем та графіком руху. Особливістю цієї методики є те, що розрахунок теплових режимів двигуна здійснюється на основі еквівалентної теплової схеми заміщення з використанням методу вузлових потенціалів для електричних кіл. На їх підставі для запропонованої універсальної еквівалентної теплової схеми заміщення складена система диференціальних рівнянь теплового балансу. За результатами моделювання встановлено наступне:

– максимальне перегрівання над температурою охолоджувального середовища має лобова частина обмотки статора;

– рух розглянутого вантажного потягу за встановленою ділянкою колії та графіком можливо проводити не більш ніж два рази, потім потрібно проводити зупинку для охолодження двигунів, або застосовувати інший графік руху.

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: монография. – Д.: Изд. Днепр. нац. ун-та ж/д трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.
3. Мокін О. Б., Мокін Б. І. Моделювання та оптимізація руху багатомасових електричних транспортних засобів поверхнями зі складним рельєфом: монографія. Мокін. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 192 с.
4. Дмитриенко В. Д., Заковоротний А. Ю. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов. – Х.: Изд. центр «НТМТ», 2013. – 248 с.
5. Петренко О. М., Любарський Б. Г. Визначення ефективності електрорухомого складу. Основні положення та підходи // 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. – pp. 269 – 298.
7. Karpe, Hilbert J. Optimal control theory and the linear bellman equation // Inference and Learning in Dynamic Models. – 2011. – pp. 363 – 387.
8. Петренко О. М., Любарський Б. Г., Глебова М. Л. Алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 6 (1178). – С. 89 – 95.
9. Петренко О. М., Доманський І. В., Любарський Б. Г. Методика оптимізації режимів роботи асинхронного тягового приводу рухомого складу // Механіка та машинобудування. – 2016. – №1. – С. 59 – 67.
10. Петрушин В. С., Рябинин С. В., Якимец А. М. Расчет температур конструктивных элементов асинхронных двигателей в динамических режимах // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2000. – № 403. – С. 145 – 149.

References (transliterated)

1. Lyubarskiy B. G. *Teoretichni osnovy dlya vyboru ta otsinky perspektivnykh system elektromekhanichnogo peretvorennia energii elektrorukhomogo skladu : dis. d-ra tekhn. nauk 05.22.09.* [Theoretical basis for choosing and estimating perspective systems for electromechanic transformation of the energy of an electric rolling stock. Abstract of the thesis dis. Dr. of Engineering Sciences 05.22.09]. Natsional'nyy tekhnichnyy universytet «Kharkiv's'kyu politekhnichnyy instytut», Kharkiv, 2014. 368p.
2. Get'man G. K. *Nauchnye osnovy opredeleniya ratsional'nogo moshchnostnogo ryada tyagovykh sredstv zheleznodorozhnogo transporta : monografiya* [Scientific basis for determining rational power range for traction railway units: monograph]. Dnepropetrovsk, Izd. Dnepr. nats. un-ta zh/d transp. im. akad. V. Lazaryana Publ., 2008. 444 p.
3. Mokin O. B., Mokin B. I. *Modelyuvannya ta optymizatsiya rukhu bagatomasovykh elektrychnykh transportnykh zasobiv poverkhnymy zi skladnym rel'yefom : monografiya* [Modeling and optimization of the motion of multimass electric vehicles on the surfaces with complex lay: monograph]. Vinnitsa, VNTU Publ., 2013. 192 p.
4. Dmitrienko V. D., Zakovorotnyy A. Yu. *Modelirovanie i optymizatsiya protsessov upravleniya dvizheniem dizel-poezdov* [Modeling and optimization of diesel train motion management]. Kharkov, Izd. tsentr "NTMT" Publ., 2013. 248 p.
5. Petrenko O. M., Lyubarskiy B. G. *Vyznachennya efektyvnosti elektrorukhomogo skladu. Osnovni polozhennya ta pidkhody* [Determining the efficiency of an electric rolling stock. Main positions and approaches]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti* [Information management systems for railway]. 2015, no. 6, pp. 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. Petrenko O. M., Lyubarskiy B. G., Glebova M. L. *Algoritm sintezu ekspertnoyi systemy upravlinnya rukhom elektrorukhomogo skladu na osnovi rishennya rivnyannya Gamil'tona-Yakobi-Bellmana* [An algorithm for synthesizing an expert system for managing electric rolling stock motion based on solving the Hamilton-Jacobi-Bellman equation]. *Visnik Nats. tekhn. un-tu «KhPI» : zb. nauk. pr. Seriya : Matematychnye modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh* [Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2016, no. 6 (1178), pp. 89–95.
9. Petrenko O. M., Domanskiy I. V., Lyubarskiy B. G. *Metodyka optymizatsiyi rezhymiv roboty asynkhronnogo tyagovogo pryvodu rukhomogo skladu* [A method for optimizing the operation of the asynchronous traction drive of a rolling stock]. *Mekhanika ta mashynobuduvannya* [Mechanics and mechanical engineering]. 2016, no. 1, pp. 59–67.
10. Petrushin V.S., Ryabinin S.V., Yakimets A.M. *Raschet temperatur konstruktivnykh elementov asinkhronnykh dvigateley v dinamicheskikh rezhimakh* [Computing the temperature of the constructive items of asynchronous engines in the dynamic]. *Visnyk Natsional'nogo universytetu «Lviv's'ka politekhnika»* [Bulletin of the National University «Lviv Polytechnic»]. 2000, no. 403, pp. 145–149.

Надійшла (received) 06.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання теплових процесів у тяговому асинхронному двигуні вантажного електровозу при русі на ділянці колії с заданим профілем та графіком руху / О. М. Петренко, Б. Г. Любарський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 112 – 116. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2222-0631.

Моделирование тепловых процессов в тяговом асинхронном двигателе грузового электровоза при движении на участке пути с заданным профилем и графиком движения / А. Н. Петренко, Б. Г. Любарский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 112 – 116. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2222-0631.

Modeling thermal processes in the traction asynchronous engine of a cargo electric locomotive moving on a section of a track with the given profile and traffic schedule / O. M. Petrenko, B. G. Lyubarskiy // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – № 6 (1228). – pp. 112 – 116. Bibliog.: 10 titles. – ISSN 2222-0631.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Петренко Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків; тел.: (095) 688-27-16; e-mail: petersanya2007@mail.ru.

Петренко Олександр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, г. Харьков; тел.: (095) 688-27-16; e-mail: petersanya2007@mail.ru.

Petrenko Oleksandr Mykolayovych – Candidate of Technical Sciences, A. N. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Kharkov; tel.: (095) 688-27-16; e-mail: petersanya2007@mail.ru.

Любарський Борис Григорович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (067) 993-75-69; e-mail: lboris19111972@mail.ru.

Любарский Борис Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (067) 993-75-69; e-mail: lboris19111972@mail.ru.

Lyubarskiy Boris Grygorovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: (067) 993-75-69; e-mail: lboris19111972@mail.ru.