

УДК 629.429.3:621.313

О. М. ПЕТРЕНКО¹ (ХНУМГ), В. В. БОЖКО² (УКРЗАЛІЗНИЦЯ), М. В. ХВОРОСТ³ (ХНУМГ)

^{1,3}Кафедра «Електротранспорт», Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, 61002, Україна, ел. пошта: petersanya1972@gmail.com, bqd@kname.edu.ua, ORCID: orcid.org/0000-0003-4027-4818, orcid.org/0000-0002-2606-8228

²Харківське відділення, Державне підприємство «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» ПАТ «Українська залізниця», вул. Івана Федорова, 39, м. Київ, 03038, ел. пошта: hf_dndc@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6068-2881

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТЕПЛОВОЇ ПРОВІДНОСТІ МІЖ ЗОВНІШНІМ ПОВІТРЯМ І КОРПУСОМ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ТРАМВАЙНОГО ВАГОНУ

Вступ та постановка проблеми

На сучасних трамвайних вагонів в тяговий привід все частіше створюється на основі асинхронних тягових двигунів (АТД) зі ступенем захисту IP44 та IP54. Процеси перетворення енергії у тягових двигунах трамвайних вагонів супроводжуються її втратами у елементах конструкції, що обумовлені фізичними процесами при перетворенні енергії [1, 2]. Температура елементів конструкції тягових двигунів збільшується з часом роботи і може перевищити допустимі конструктивні обмеження [2, 3]. Особливо це стосується температури ізоляції обмоток двигуна, яка обмежена класом застосованої ізоляції [3, 4]. Для зменшення температури в елементах конструкції двигунів застосовуються системи охолодження, які підвищують ефективність теплообміну елементів конструкції двигуна при застосуванні вентиляції повітрям [5, 6]. В таких двигунах застосовуються двоконтурна система самовентиляції до якої входить вентилятор, що безпосередньо встановлений на свободному кінці валу двигуна та забезпечує потік повітря який охолоджує станину двигуна, а також внутрішній вентилятор, що забезпечує внутрішню циркуляцію внутрішнього повітря.

Літературний огляд

Для моделювання теплового стану низьки асинхронних частотно-керованих двигунів, до яких належать АТД, в роботах [7, 8] запропоновано використання універсальної теплової схеми заміщення. В роботі [9] запропоновано спростити цю схему для тягових двигунів зі ступенем захисту IP 54. Однак для коректної постановки задачі моделювання теплового стану необхідно ідентифікація параметрів цієї

схеми, одним з яких є провідність між зовнішнім повітрям і корпусом.

Мета статті

Розробка методики визначення теплової провідності між зовнішнім повітрям і корпусом еквівалентної теплової схеми заміщення асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону.

Основний матеріал дослідження

Еквівалентну теплову схему заміщення, що запропоновано в роботі [9], наведено на рис. 1.

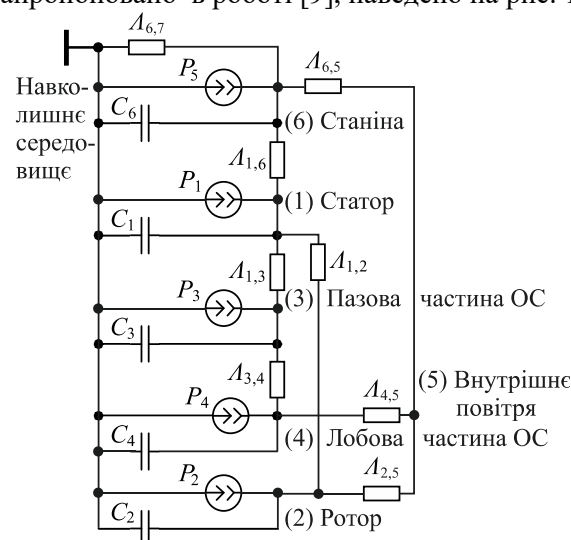


Рис. 1. Еквівалентної теплової схеми заміщення для АТД з ступенем захисту IP54

Тепловий опір між зовнішнім повітрям і корпусом

$$R(6,7) = \frac{1}{\frac{1}{R_{вс,нр}} + \frac{1}{R_{вс}} + \frac{1}{R_{вс,в}} + \frac{1}{R_{вц,нр}} + \frac{1}{R_{вц,в}}} \quad (1)$$

де $R_{вс,пр}$ – тепловий опір між зовнішньою поверхнею звисаючої частини станини з боку приводу і зовнішнім повітрям, $R_{вс}$ – тепловий опір між зовнішньою поверхнею станини над пакетом і зовнішнім повітрям, $R_{вс,в}$ – тепловий опір між зовнішньою поверхнею звисаючої частини станини з боку вентилятора і зовнішнім повітрям, $R_{вщ,пр}$ – тепловий опір між зовнішньою поверхнею підшипникового щита з боку приводу і зовнішнім повітрям, $R_{вщ,в}$ – тепловий опір між зовнішньою поверхнею підшипникового щита з боку вентилятора і зовнішнім повітрям.

Тепловий опір між зовнішньою поверхнею станини над пакетом і зовнішнім повітрям:

$$R_{вс} = \frac{1}{\alpha_{с,н} \cdot l_n \cdot (\pi \cdot D_c - z_p \cdot \delta_p + 2 \cdot h_p \cdot z_p \cdot \eta_p)}, \quad (2)$$

де $\alpha_{с,н}$ – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні станини над пакетом, D_c – діаметр станини біля основи ребер, z_p – кількість ребер станини, δ_p – товщина ребра станини, h_p – висота ребра станини, η_p – коефіцієнт якості ребра станини.

Тепловий опір між зовнішньою поверхнею звисаючої частини станини з боку приводу і зовнішнім повітрям:

$$R_{вс,пр} = \frac{1}{\alpha_{с,пр} \cdot l_{св,пр} \cdot (\pi \cdot D_c - z_p \cdot \delta_p + 2 \cdot h_p \cdot z_p \cdot \eta_p)}, \quad (3)$$

де $\alpha_{с,пр}$ – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні станини з боку приводу.

Тепловий опір між зовнішньою поверхнею звисаючої частини станини з боку вентилятора і зовнішнім повітрям:

$$R_{вс,в} = \frac{1}{\alpha_{с,в} \cdot l_{св,в} \cdot (\pi \cdot D_c - z_p \cdot \delta_p + 2 \cdot h_p \cdot z_p \cdot \eta_p)}, \quad (4)$$

де $\alpha_{с,в}$ – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні станини з боку вентилятора.

Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні станини над пакетом:

$$\alpha_{с,н} = \alpha_{вх} \cdot \frac{d_z}{\gamma \cdot l_n} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\gamma \cdot l_n}{d_z}} \right), \quad (5)$$

де $\alpha_{вх}$ – коефіцієнт тепловіддачі на вході в міжреберні канали станини d_r – гідравлічний діаметр міжреберного каналу, γ – коефіцієнт зменшення тепловіддачі по довжині станини.

Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні станини з боку приводу:

$$\alpha_{с,в} = \alpha_{вх} \cdot \frac{d_z}{\gamma \cdot l_{св,в}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\gamma \cdot l_{св,в}}{d_z}} \right). \quad (7)$$

Гідравлічний діаметр міжреберного каналу

$$d_z = \frac{4 \cdot h_p \cdot (t_p - \delta_p)}{2 \cdot h_p + t_p - \delta_p}, \quad (8)$$

де t_p – крок ребер станини

Коефіцієнт зменшення тепловіддачі по довжині станини:

$$\gamma = 0,055 \cdot \left[1 - th \left[0,062 \cdot \left(\frac{D_c}{d_z} - 12,5 \right) \right] \right], \quad (9)$$

Коефіцієнт тепловіддачі на вході в міжреберні канали станини:

$$\alpha_{вх} = \frac{Nu_{вх} \cdot \lambda_{св}}{d_z}, \quad (10)$$

де $Nu_{вх}$ – число Нуссельта для міжреберних каналів.

Число Нуссельта для міжреберних каналів:

$$Nu_{вх} = 0,627 \cdot Re_{эф}^{0,52}, \quad (11)$$

де $Re_{эф}$ – число Рейнольдса для міжреберних каналів.

Число Рейнольдса для міжреберних каналів:

$$Re_{эф} = \frac{\omega_{эф} \cdot d_z}{\nu}, \quad (12)$$

де $\omega_{эф}$ – ефективна швидкість на вході в міжреберні канали.

Ефективна швидкість на вході в міжреберні канали:

$$\omega_{эф} = \sqrt{\omega_{вх}^2 + (0,5 \cdot u_{вент})^2}, \quad (13)$$

де $\omega_{вх} \approx 0,45 \cdot u_{вент}$ – витратна швидкість на вході в канали, $u_{вент}$ – окружна швидкість вентилятора.

Коефіцієнт якості ребра станини:

$$\eta_p = \frac{th(mh)}{mh}, \quad (14)$$

$$mh = h_p \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{с,н}}{\delta_p \cdot \lambda_{св}}}, \quad (15)$$

де $\lambda_{ст}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу станини.

Тепловий опір між зовнішньою поверхнею підшипникового щита з боку приводу і зовнішнім повітрям:

$$R_{вщ,пр} = \frac{1}{\alpha_{щ,пр} \cdot F_{щ}}, \quad (16)$$

де $\alpha_{щ,пр}$ – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні підшипникового щита з боку приводу.

Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні підшипникового щита з боку приводу:

$$\alpha_{щ,пр} = 20 + 1,6 \cdot u_{вент}^{0,7} \quad (17)$$

Тепловий опір між зовнішньою поверхнею підшипникового щита з боку вентилятора і зовнішнім повітрям:

$$R_{вщ,в} = \frac{1}{\alpha_{щ,в} \cdot F_{щ}}, \quad (18)$$

де $\alpha_{щ,в}$ – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні підшипникового щита з боку вентилятора.

Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні підшипникового щита з боку вентилятора:

$$\alpha_{щ,в} = 20 + 9,4 \cdot u_{вент}^{0,6} \quad (19)$$

Остаточно теплова провідність між зовнішнім повітрям і корпусом для асинхронних тягових двигунів зі ступенем захисту IP54 визначається виразом:

$$L(6,7) = \frac{1}{R(7,6)}. \quad (20)$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Любарський, Б. Г. Рациональні швидкісні режими руху приміського електропоїзду з асинхронними тяговими двигунами / Б.Г. Любарський // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". — 2015. — № 8(1127). — С. 86—92.
2. Mizuno, S. Development of a Totally Enclosed Fan-Cooled Traction Motor / Sueyoshi Mizuno, Shinichi Noda, Makoto Matsushita, Taihei Koyama, Shigetomo Shiraishi //IEEE Transactions on Industry Applications. — 2013. — Vol. 49, No.4, july/august. — P 1508—1513.
3. Nakahama, T. Coolingairflow in unidirectional ventilated open-type motors for electric vehicles / T. Nakahama, K. Suzuki, S. Hashidume, F. Ishibashi // IEEE Trans. Energy Convers. — 2006. — Vol. 21, No. 3, Sep. — P. 645—651.

За запропонованою методикою були визначні теплові провідності між зовнішнім повітрям і корпусом для асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону АД 931 зі різними частотами обертання двигуна, які склали: 6,13 Вт/К при 10 об/хв; 44 Вт/К при 1000 об/хв; 62,4 Вт/К при 2000 об/хв; 89 Вт/К при 3000 об/хв; 6,13 Вт/К при 4000 об/хв; 93,5 Вт/К при 4400 об/хв, яка є максимальною частотою обертання двигуна.

Висновки

1. Розроблено методику визначення теплової провідності між зовнішнім повітрям і корпусом еквівалентної теплової схеми заміщення асинхронного тягового двигуна зі ступенем захисту IP 54, що застосовується на трамвайному вагоні. Особливості методики є визначення провідності з урахуванням теплової опірив між наступними поверхнями: зовнішня поверхня звисаючої частини станини з боку приводу і зовнішнім повітрям; зовнішня поверхня станини над пакетом і зовнішнім повітрям, зовнішня поверхня звисаючої частини станини з боку вентилятора і зовнішнім повітрям, зовнішня поверхня підшипникового щита з боку приводу і зовнішнім повітрям, а також між зовнішньою поверхнею підшипникового щита з боку вентилятора і зовнішнім повітрям.

2. За запропонованою методикою були визначні теплові провідності між зовнішнім повітрям і корпусом для асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону АД 931 з різними частотами обертання двигуна. Було показано що теплові провідності між зовнішнім повітрям і корпусом збільшується з 6,13 Вт/К при 10 об/хв до 93,5 Вт/К при 4400 об/хв, що значно впливає на теплові режими роботи двигуна.

REFERENCES

1. Liubarskyi, B. H. Ratsionalni shvydkisni rezhymy rukhu prymiskoho elektrovozdu z asynkhronnymy tiahovymy dvyhunamy / B.H. Liubarskyi // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskyi politekhnichnyi instytut". — 2015. — № 8(1127). — S. 86—92.
2. Mizuno, S. Development of a Totally Enclosed Fan-Cooled Traction Motor / Sueyoshi Mizuno, Shinichi Noda, Makoto Matsushita, Taihei Koyama, Shigetomo Shiraishi //IEEE Transactions on Industry Applications. — 2013. — Vol. 49, No.4, july/august. — P 1508—1513.
3. Nakahama, T. Coolingairflow in unidirectional ventilated open-type motors for electric vehicles / T. Nakahama, K. Suzuki, S. Hashidume, F. Ishibashi // IEEE Trans. Energy Convers. — 2006. — Vol. 21, No. 3, Sep. — P. 645—651.

4. Cuiping, L. I. Analysis of 3D static temperature field of water cooling induction motor in mini electric vehicle / L. I. Cuiping, P. E. I. Yulong, N. I. Ronggang, C. Shukang // Proc. ICEMS. — 2011. — P. 1—5.

5. Nakahama, T. Improved cooling performance of large motors using fans / T. Nakahama, D. Biswas, K. Kawano, F. Ishibashi // IEEE Trans. Energy Convers. — 2006. — Vol. 21, No. 2, Jun. — P. 324—331.

6. Boglietti, A. Evolution and Modern Approach for Thermal Analysis of Electrical Machines / A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, C. Mejuto // IEEE transactions on industrial electronics. — 2009. — Vol. 56, No. 3, March. P. 871—882.

7. Петрушин В.С. Универсальная тепловая схема замещения асинхронных двигателей / В.С. Петрушин, А.М. Якимец // Электромашинобудовання та електрообладнання. — 2002. — № 59. — С. 75—79.

8. Петрушин, В. С. Особенности тепловых расчетов неустановившихся режимов работы регулируемых асинхронных двигателей / В. С. Петрушин, А. М. Якимец, О. В. Каленик // Электромашиностроение и электрооборудование. — 2008. — № 71. — С. 47—51.

9. Петренко, О. М. Математична модель теплового стану тягових асинхронних двигунів трамвайних вагонів / О. М. Петренко, Б. Г. Любарський, М.Л. Глебова // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2017. — № 2(42). — С. 43—47.

4. Cuiping, L. I. Analysis of 3D static temperature field of water cooling induction motor in mini electric vehicle / L. I. Cuiping, P. E. I. Yulong, N. I. Ronggang, C. Shukang // Proc. ICEMS. — 2011. — P. 1—5.

5. Nakahama, T. Improved cooling performance of large motors using fans / T. Nakahama, D. Biswas, K. Kawano, F. Ishibashi // IEEE Trans. Energy Convers. — 2006. — Vol. 21, No. 2, Jun. — P. 324—331.

6. Boglietti, A. Evolution and Modern Approach for Thermal Analysis of Electrical Machines / A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, C. Mejuto // IEEE transactions on industrial electronics. — 2009. — Vol. 56, No. 3, March. P. 871—882.

7. Petrushin V.S. Universalnaya teplovaya shema zamescheniya asinhronnykh dvigateley / V.S. Petrushin, A.M. Yakimets // Elektromashinobudovannya ta elektroobladnannya. — 2002. — № 59. — S. 75—79.

8. Petrushin, V. S. Osobennosti teplovykh raschetov neustanovivshihsy rezhimov raboty reguliruemyykh asinhronnykh dvigateley / V. S. Petrushin, A. M. Yakimets, O. V. Kalenik // Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie. — 2008. — № 71. — S. 47—51.

9. Petrenko, O. M. Matematychna model teplovoho stanu tiahovykh asynkhronnykh dvyhuniv tramvaynykh vahoniv / O. M. Petrenko, B. H. Liubarskyi, M.L. Hliebova // Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. — 2017. — № 2(42). — S. 43—47.

Надійшла до друку 19.04.2017.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Сокол С. І.*

Стаття присвячена методиці визначення теплової провідності між зовнішнім повітрям і корпусом еквівалентної теплової схеми заміщення асинхронного тягового двигуна зі ступенем захисту IP 54, що застосовується на трамвайному вагоні. Особливості методики є визначення провідності з урахуванням тепловий опір між наступними поверхнями: зовнішня поверхня звисаючої частини станини з боку приводу і зовнішнім повітрям; зовнішня поверхня станини над пакетом і зовнішнім повітрям, зовнішня поверхня звисаючої частини станини з боку вентилятора і зовнішнім повітрям, зовнішня поверхня підшипникового щита з боку приводу і зовнішнім повітрям, а також між зовнішньою поверхнею підшипникового щита з боку вентилятора і зовнішнім повітрям.

За запропонованою методикою були визначні теплові провідності між зовнішнім повітрям і корпусом для асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону АД 931 з різними частотами обертання двигуна. Було показано що теплові провідності між зовнішнім повітрям і корпусом збільшуються з 6,13 Вт/К при 10 об/хв до 93,5 Вт/К при 4400 об/хв, що значно впливає на теплові режими роботи двигуна.

Ключові слова: асинхронний тяговий двигун; еквівалентна тепла схема заміщення; тепловий опір; тепла провідність; коефіцієнт тепловіддачі; критерій Рейнольдса.

УДК 629.429.3:621.313

А. Н. ПЕТРЕНКО¹ (ХНУГХ), В. В. БОЖКО² (УКРЗАЛИЗНИЦЯ), Н. В. ХВОРОСТ³ (ХНУГХ)

^{1,3}Кафедра «Електротранспорт», Харьковський національний університет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, г. Харьков, 61002, Украина, эл. почта: petersanya1972@gmail.com, bgd@kname.edu.ua, ORCID: orcid.org/0000-0003-4027-4818, orcid.org/0000-0002-2606-8228

²Харківське відділення, Государственное предприятие «Проектно-изыскательский институт железнодорожного транспорта» ПАО «Украинская железная дорога», ул. Ивана Федорова, 39, г. Киев, 03038, эл. почта: hf_dndc@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6068-2881

© Петренко О. М. та ін., 2017

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОЙ ПРОВОДИМОСТИ МЕЖДУ НАРУЖНЫМ ВОЗДУХОМ И КОРПУСОМ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕПЛОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНА

Статья посвящена методике определения тепловой проводимости между наружным воздухом и корпусом эквивалентной тепловой схемы замещения асинхронного тягового двигателя со степенью защиты IP 54, которые применяются на трамвайных вагонах. Особенности методики является определение проводимости с учетом тепловой сопротивлений между следующими поверхностями: внешняя поверхность свисающей части станины со стороны привода и наружным воздухом; внешняя поверхность станины над пакетом и наружным воздухом, внешняя поверхность свисающей части станины со стороны вентилятора и наружным воздухом, внешняя поверхность подшипникового щита со стороны привода и наружным воздухом, а также между внешней поверхностью подшипникового щита со стороны вентилятора и наружным воздухом.

По предложенной методике были определены тепловые проводимости между наружным воздухом и корпусом для асинхронного тягового двигателя трамвайного вагона АД 931 параметры с различными частотами вращения двигателя. Было показано, что тепловые проводимости между наружным воздухом и корпусом увеличивается с 6,13 Вт/К при 10 об/мин до 93,5 Вт/К при 4400 об/мин, что значительно влияет на тепловые режимы работы двигателя.

Ключевые слова: асинхронный тяговый двигатель; эквивалентная тепловая схема замещения; тепловое сопротивление; тепловая проводимость; коэффициент теплоотдачи; критерий Рейнольдса.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Сокол Е. И.*

UDC 629.429.3:621.313

O. M. PETRENKO¹ (NUUE), V. V. BOZHKO² (UKRZALIZNYTSIA), M. V. KHVOROST³ (NUUE)

^{1,3} Department of "Electrotransport", Kharkiv National University of Municipal Economy. A. N. Beketova, Marshal Bazhanov str., 17, Kharkov, 61002, Ukraine, e-mail: petersanya1972@gmail.com, bgd@kname.edu.ua, ORCID: orcid.org/0000-0003-4027-4818, orcid.org/0000-0002-2606-8228

² Kharkivske Branch, State Enterprise "Design and Exploration Institute of Railway Transport" PJSC "Ukrainian Railways", Ivan Fedorov str., 39, Kyiv, 03038, e-mail: hf_dndc@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6068-2881

IDENTIFICATION OF THERMAL CONDUCTIVITY BETWEEN EXTERNAL AIR AND THE CASE OF THE EQUIVALENT HEAT SCHEME OF SUBSTITUTION OF THE ASYNCHRONOUS TRACTION ENGINE OF A TRAW WAGON

The article is devoted to the method of determining the thermal conductivity between the external air and the equivalent thermal circuit for the replacement of an asynchronous traction motor with IP 54 protection level, which is used on tram cars. The specific features of the technique is the determination of conductivity, taking into account the thermal resistances between the following surfaces: the outer surface of the drooping part of the frame on the drive side and the outside air; The outer surface of the bed above the bag and the outside air, the outer surface of the hanging part of the frame on the fan side and the outside air, the outer surface of the bearing shield on the drive side and the outside air, and between the outer surface of the bearing shield on the fan side and the outside air.

According to the proposed method, the thermal conductivities between the external air and the hull for the asynchronous traction engine of the tram car AD 931 were determined with parameters with different engine speeds. It was shown that the thermal conductivity between the external air and the body increases from 6.13 W / K at 10 rpm to 93.5 W / K at 4400 rpm, which significantly affects the thermal conditions of the engine

Keywords: induction traction motor; equivalent thermal equivalent circuit; thermal resistance; thermal conductivity; heat transfer coefficient; Reynolds number.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Sokol Ye. I.*