

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**В. С. Петрушин¹, Ю. Р. Плоткин², А. М. Якимец¹ Р. Н. Еноктаев¹**¹Одесский национальный политехнический университет²Берлинская школа экономики и права

Аннотация. Определены семейства температурных характеристик, представляющих собой зависимости перегревов конструктивных частей частотно-регулируемого асинхронного двигателя от момента нагрузки для разных частот питающего напряжения. Эти характеристики сопоставлены с аналогичными характеристиками, полученными в результате тепловых экспериментов. Выполнен переход к температурным регулировочным характеристикам. Теоретически и экспериментально рассмотрены термодинамические процессы при работе регулируемого привода на заданную тахограмму.

Ключевые слова: регулируемый асинхронный двигатель, эквивалентная тепловая схема, частотное управление, перегрев обмотки статора, перегрев подшипника, термодинамические процессы, экспериментальные исследования.

Введение

Эксплуатационная надежность электрических машин зависит от их теплового состояния, поскольку большинство преждевременных выходов из строя асинхронных двигателей (АД) вызвано ускоренным старением изоляции обмотки статора вследствие перегрева. Допустимая температура нагрева обмотки АД ограничивается классом нагревостойкости применяемых изоляционных материалов. Относительно часто АД выходят из строя из-за повреждений подшипников, одной из причин чего является их перегрев. При повторно-кратковременных и перемежающихся режимах нагрузки возникают переходные процессы, характеризующиеся значительными увеличениями потерь АД и, как следствие, существенным ростом температур его конструктивных элементов. Регулируемые асинхронные двигатели (РАД) работают в различных точках диапазона регулирования, характеризующихся разными значениями тепловых потерь и отвода тепла в окружающую среду при изменении частоты вращения двигателей с самовентиляцией. При тепловом расчете РАД должны быть учтены не только изменения величины нагрузки соответственно зависимости момента сопротивления от скорости, но и параметров питающей двигатель электроэнергией, получаемой от преобразователя частоты (ПЧ) (величина и частота напряжения, его гармонический состав). Поэтому анализ теплового состояния РАД, как в статических, так и в динамических режимах

необходим при исследованиях работы регулируемых электроприводов.

Проблемам, связанным с анализом теплового состояния РАД и тепловыми расчетами, посвящены ряд работ [1-8].

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное определение перегревов некоторых конструктивных элементов РАД в статических и динамических режимах.

Материалы и результаты исследований

В практике тепловых расчетов ЭМ широкое распространение получил метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС). Он основывается на хорошо разработанной теории электрических и тепловых цепей и позволяет определять средние температуры частей АД. По методу ЭТС электрическая машина представляется в виде системы однородных тел (элементов), в пределах которых условия теплоотдачи остаются примерно постоянными. Реальные тепловые связи между отдельными частями машины представляются в виде тепловых проводимостей либо сопротивлений. Для каждого анализируемого элемента температура принимается постоянной величиной и равной среднему значению. Считается, что охлаждение машины симметрично и равномерно в поперечном сечении. Для расчета также принимаются следующие упрощения: короткозамкнутый ротор представляет собой один элемент, охлаждением торцевых поверхностей сердечников статора, ротора можно пренебречь. Допускается, что тепловые проводимости независимы от температуры. В этом случае задача сводится к линейной. Представленная на рис.1 ЭТС для АД исполнения IP44 и способом охла-

ждения IC0141 может быть использована для анализа теплового состояния двигателя в динамических режимах, а при исключении тепловых емкостей C , значения которых зависят от используемых материалов и их геометрических размеров, и в статических режимах.

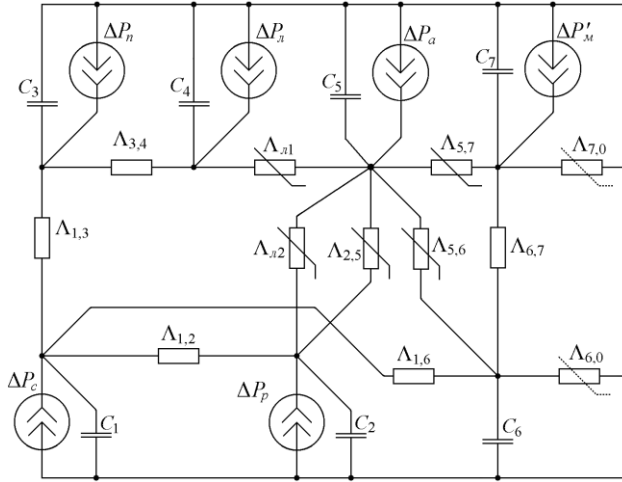


Рис.1 Эквивалентная тепловая схема АД

В состав ЭТС входят элементы, отражающие изменяющиеся по величине потери в различных частях машины. Их значения получены в результате электромагнитного расчета. В данной ЭТС используются следующие тепловые проводимости: $\Lambda_{1,2}$ – между сердечниками статора и ротора через воздушный зазор; $\Lambda_{1,3}$ – от меди обмотки к сердечнику статора по изоляции пазовой части обмотки; $\Lambda_{1,6}$ – от пакета статора к станине (для закрытых АД); $\Lambda_{1,1}$ – от лобовых частей обмотки статора к внутреннему воздуху; $\Lambda_{2,5}$ – от активной зоны ротора к внутреннему воздуху; $\Lambda_{1,2}$ – от лобовых частей беличьей клетки к внутреннему воздуху; $\Lambda_{3,4}$ – тепловая проводимость обмотки статора в аксиальном направлении; $\Lambda_{5,6}$ – проводимость от внутреннего воздуха к станине; $\Lambda_{5,7}$ – от внутреннего воздуха к подшипниковым щитам; $\Lambda_{6,7}$ – между станиной и подшипниковыми щитами; $\Lambda_{6,0}$ – от обдуваемой поверхности станины к охлаждающему воздуху; $\Lambda_{7,0}$ – от подшипниковых щитов к охлаждающему воздуху. Потери в конструктивных элементах АД и тепловые проводимости, значения которых зависят от частоты вращения, изменяются. Такие проводимости изображены на схеме как переменные. Проводимости, изображенные как переменные пунктиром, изменяются при самоохлаждении и остаются неизменными при обдуве независимым вентилятором. Используя значения потерь (ΔP_c – полные потери в стали статора, $\Delta P_p = \Delta P_{\text{эл}2} + \Delta P_{\text{с}2}$ – суммарные

электрические и магнитные потери в роторе, $\Delta P_{\text{л}}$ – электрические потери в лобовых частях обмотки статора, ΔP_n – электрические потери в пазовых частях обмотки статора ($\Delta P_{\text{эл}1} = \Delta P_{\text{л}} + \Delta P_n$), ΔP_a – внутренние вентиляционные потери; $\Delta P'_m = \Delta P_{\text{мех}} \cdot k_{\text{умп}}$ – греющие механические потери в подшипниках, где $k_{\text{умп}}$ – коэффициент учета механических потерь), определяются температуры семи конструктивных элементов машины: пакета стали статора, пазовой части обмотки статора, ротора, станины, внутреннего воздуха, подшипниковых щитов, лобовой части обмотки статора ($\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_7$).

Вектор перегревов конструктивных элементов $[\Theta]$ определяется в результате решения уравнения:

$$[\Theta] = [\Lambda]^{-1} \cdot [\Delta P], \quad (1)$$

где $[\Lambda]$ – матрица проводимостей; $[\Delta P]$ – вектор греющих потерь в соответствующем элементе.

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \Sigma \Lambda_1 & -\Lambda_{1,2} & -\Lambda_{1,3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\Lambda_{1,2} & \Sigma \Lambda_2 & 0 & 0 & -\Lambda_{2,5} & -\Lambda_{1,2} & 0 \\ -\Lambda_{1,3} & 0 & \Sigma \Lambda_3 & -\Lambda_{3,4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Lambda_{3,4} & \Sigma \Lambda_4 & -\Lambda_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & -\Lambda_{2,5} & -\Lambda_{1,2} & 0 & -\Lambda_{1,1} & \Sigma \Lambda_5 & -\Lambda_{5,6} & -\Lambda_{5,7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Lambda_{5,6} & \Sigma \Lambda_6 & -\Lambda_{6,7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Lambda_{5,7} & -\Lambda_{6,7} & \Sigma \Lambda_7 \end{bmatrix},$$

где $\Sigma \Lambda_i$ – элементы главной диагонали матрицы проводимостей $[\Lambda]$:

$$[\Sigma \Lambda] = \begin{bmatrix} \Lambda_{1,2} + \Lambda_{1,3} + \Lambda_{1,6} \\ \Lambda_{1,2} + \Lambda_{1,2} + \Lambda_{2,5} \\ \Lambda_{1,3} + \Lambda_{3,4} \\ \Lambda_{3,4} + \Lambda_{1,1} \\ \Lambda_{1,2} + \Lambda_{2,5} + \Lambda_{1,1} + \Lambda_{5,6} + \Lambda_{5,7} \\ \Lambda_{1,6} + \Lambda_{5,6} + \Lambda_{6,7} + \Lambda_{6,0} \\ \Lambda_{5,7} + \Lambda_{6,7} + \Lambda_{7,0} \end{bmatrix},$$

$$[\Delta P] = \begin{bmatrix} \Delta P_c \\ \Delta P_p \\ \Delta P_n \\ \Delta P_{\text{л}} \\ \Delta P_a \\ 0 \\ \Delta P'_m \end{bmatrix}, \quad [\Theta] = \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \\ \Theta_3 \\ \Theta_4 \\ \Theta_5 \\ \Theta_6 \\ \Theta_7 \end{bmatrix}.$$

Тепловой расчет выполняется для каждого задаваемого параметра регулирования и изменения нагрузки на валу двигателя. По результатам расчета производится построение семейств зави-

симостей температур перегревов конструктивных элементов РАД при изменении нагрузки для различных параметров регулирования, при наложении на которые характеристики механизма, осуществляется переход к тепловым регулировочным характеристикам. Таким образом, получают характеристики изменения превышения температур конструктивных элементов РАД над температурой охлаждающей среды во всем диапазоне регулирования при работе привода на определенную по величине и характеру нагрузку.

На кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета разработана программа DIMASDrive [9], позволяющая проводить электромагнитные, электро-механические, тепловые расчеты регулируемых асинхронных двигателей.

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования тепловых показателей - температуры лобовой части обмотки статора и температуры подшипникового щита асинхронного двигателя АИР71А2У3 с самоохлаждением. Питание двигателя обеспечивалось частотным преобразователем Altivar 28 Telemecanique. Входное сетевое линейное напряжение во время эксперимента составляло 380 В. Преобразователь имел следующие настройки: $U_{ном} = 400$ В и $f_{ном} = 50$ Гц, частота модуляции 4 кГц. Характеристики были исследованы для закона частотного управления $U/f = const$. Экспериментальные температурные зависимости получены с использованием встроенных в соответствующие конструктивные элементы двигателя цифровых температурных датчиков DS18B20 фирмы Dallas Semiconductor и специализированного программного обеспечения TreeWork. На рис.2 представлены тепловые характеристики, представляющих собой зависимости соответствующих перегревов от нагрузочных моментов, при значениях частот 30 Гц и 50 Гц. Аналогично построены тепловые характеристики при других частотах.

При построении тепловых регулировочных характеристик принято, что привод работает на лифтовую нагрузку с моментом 2 Н·м (79 % от $M_{ном}$) в требуемом диапазоне регулирования 1600 ÷ 3800 об/мин.

На рис.3 представлены зависимости температур перегревов лобовой части обмотки статора и подшипникового щита при регулировании, полученные с помощью математического моделирования, а также экспериментальным путем.

Нестационарные тепловые расчеты выполняются решением системы дифференциальных уравнений теплового баланса [5,7], которая в матричной форме представляется

выражением:

$$\frac{d}{dt} \Theta = [C]^{-1} \cdot [\Delta P + \Lambda \times \Theta], \quad (2)$$

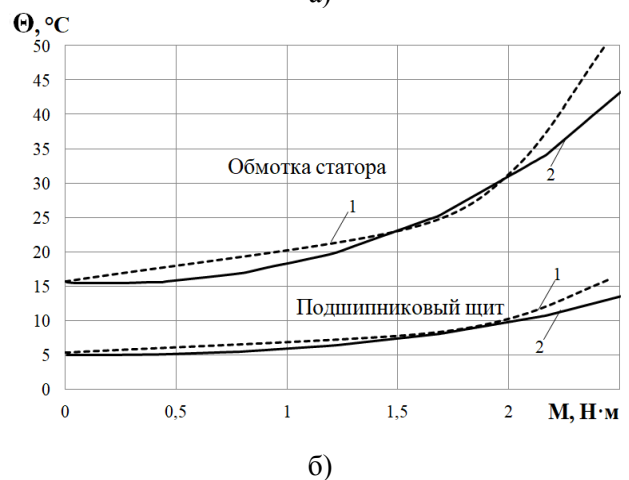
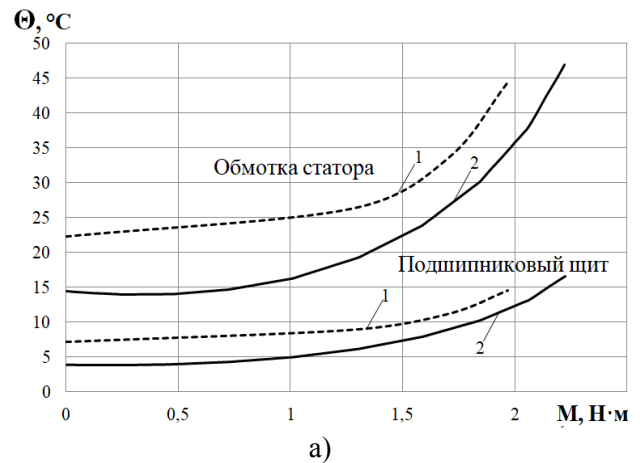


Рис.2. Тепловые характеристики при 30 Гц (а) и 50 Гц (б): 1 – эксперимент; 2 – математическое моделирование;

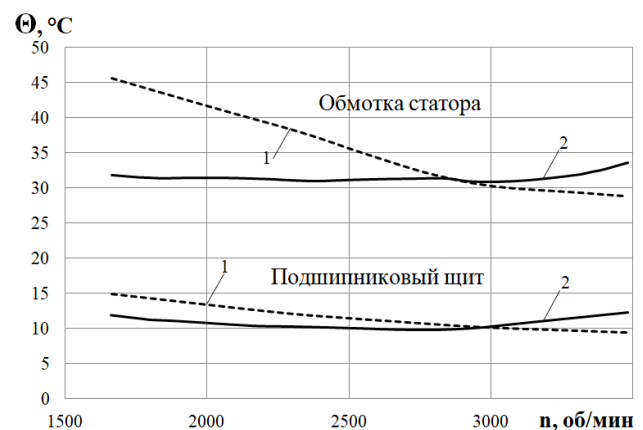


Рис.3. Зависимости температур перегревов конструктивных элементов РАД:

1 – эксперимент;
2 – математическое моделирование;

В системе дифференциальных уравнений $[C]$ – матрица теплоемкостей соответствующих конструктивных элементов, на которые

условно разбивается АД:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_n \end{bmatrix}.$$

Решение этой системы первого порядка, например, методом Рунге-Кутты, позволяет рассмотреть изменение температур конструктивных элементов АД при переходных процессах.

На рис.4 представлены теоретические зависимости температур перегревов лобовой части обмотки статора и подшипникового щита асинхронного двигателя АИР71А2У3 при неустановившемся режиме, а также экспериментальные характеристики.

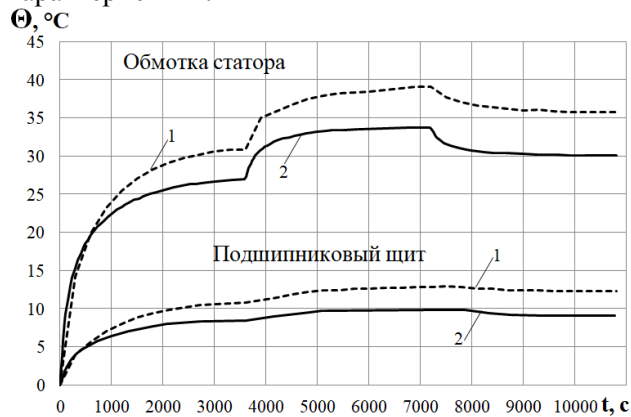


Рис.4. Зависимости изменения перегревов конструктивных элементов РАД для заданной тахограммы частоты вращения двигателя:

1 – эксперимент;

2 – математическое моделирование;

Температуры обмотки статора, подшипникового щита и окружающей среды в ходе эксперимента измерялись с помощью цифровых термодатчиков. Двигатель работал в перемежающемся режиме S8, описываемым следующим образом: в цикле 3 периода по 60 мин: FI-1,2; 0,194 кВт, 1428 об/мин, 33,3 %; 0,371 кВт, 1995 об/мин, 33,3 %; 0,267 кВт, 1705 об/мин, 33,3 %.

Выводы

Превышения температур лобовой части обмотки статора и подшипникового щита повышаются с ростом нагрузки на валу и при меньших значениях параметров регулирования имеют большие значения.

Погрешности между результатами математического моделирования и эксперимента поясняются допущением при моделировании осевой тепловой симметрии, в то время как при экспе-

рименте выполнялись замеры со стороны вала, заведомо более высокие, чем со стороны вентилятора.

Регулировочные температурные характеристики показывают запас по перегреву лобовой части обмотки статора и подшипникового щита в рассматриваемом диапазоне регулирования при заданной нагрузке на валу и классе нагревостойкости изоляции В.

Аналогичным образом могут быть рассмотрены регулировочные температурные характеристики при других нагрузках и диапазонах регулирования.

Термодинамические характеристики определяются тахограммами нагрузки и могут быть построены для разных перемежающихся режимов.

Снижению погрешностей будет способствовать учет при моделировании тепловых потерь от высших временных гармонических в питающем двигателе напряжении.

Список использованной литературы

- Захаров, А. В., Кобелев, А. С., Кудряшов, С. В. Определение превышений температуры и допустимых нагрузок закрытых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, эксплуатируемых в широком диапазоне частоты вращения [Текст] / А. В. Захаров, А. С. Кобелев, С. В. Кудряшов // *Электричество* : – 2010. – Вып. 12. – С. 35–42.
- D. Y. Antipin, D. A. Bondarenko and V. I. Vorobiev, "Results of the Experimental Studies of Thermal Processes in an Asynchronous Motor," [Electronic resource] *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934177.
- Осташевский, Н. А., Петренко, А. Н. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки [Текст] / Н. А. Осташевский, А. Н. Петренко // *Електротехніка і Електромеханіка*: – 2010. – Вып. 3. – С. 25–29.
- A. Mohammed, J. I. Melecio and S. Djurović, "Stator Winding Fault Thermal Signature Monitoring and Analysis by In Situ FBG Sensors," [Electronic resource] *in IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 10, pp. 8082–8092, Oct. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2883260.
- Петрушин, В. С., Якимец, А. М., Груша, А. В., Каленик, О. В. Корректировка тепловых расчетов регулируемых асинхронных двигателей в установившихся режимах [Текст] / В. С. Петрушин, А. М. Якимец, А. В. Груша, О. В.

Каленик // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: – 2008. – Вып. 6(53). – С. 16 – 19.

6. Петрушин, В. С., Якимец, А. М., Каленик, О. В. Особенности тепловых расчетов неустановившихся режимов работы регулируемых асинхронных двигателей [Текст] / В. С. Петрушин, А. М. Якимец, О. В. Каленик // *Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід.наук.-техн. зб.*: – 2008. Вып. 71. – С. 47–51.

7. Петрушин, В. С. Учебное пособие "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе" [Текст] // Одесса, Наука и техника: – 2006. – 320 с.

8. M. Kotsur, I. Kotsur, Y. Bezverkhnia and D. Andrienko, "Increasing of thermal reliability of a regulated induction motor in non-standard cycle time conditions," [Electronic resource] *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, 2017, pp. 88–91, doi: 10.1109/MEES.2017.8248960.

9. Петрушин, В. С., Рябинин, С. В., Якимец, А. М. Программный продукт "DIMASDrive". Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065) [Электронный ресурс]. – Киев: – Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

References

1. Zakharov, A. V., Kobelev, A. S., Kudryashov, S. V. (2010), "Determination of temperature rises and permissible loads of closed squirrel-cage induction motors, operated in a wide range of speed" ["Opredelenie prevysheniya temperatury i dopustimyykh nagruzok zakrytykh asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom, ekspluatiruemyykh v shirokom diapazone chastoty vrashcheniya"], *Elektrichestvo*, No.12, pp. 35–42.

2. D. Y. Antipin, D. A. Bondarenko and V. I. Vorobiev (2019), "Results of the Experimental Studies of Thermal Processes in an Asynchronous Motor," *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, pp. 1–5, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934177.

3. Ostashevskiy, N. A., Petrenko, A. N. (2010), "Research on thermal state of a frequency-controlled induction motor underload variation "

["Issledovanie teplovogo sostoyaniya chastotno-upravlyаемого asinkhronnogo dvigatelya pri izmenenii nagruzki"], *Electrical Engineering & Electromechanics*, No.3, pp. 25–29.

4. A. Mohammed, J. I. Melecio and S. Djurović (2019), "Stator Winding Fault Thermal Signature Monitoring and Analysis by In Situ FBG Sensors," *in IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 10, pp. 8082–8092, doi: 10.1109/TIE. 2018. 2883260.

5. Petrushin, V. S., Yakimets, A. M., Grusha, A. V., Kalenik, O.V. (2008), "Correction of thermal calculations of regulated asynchronous motors in steady state" ["Korrektirovka teplovykh raschetov reguliruemyykh asinkhronnykh dvigateley v ustanovivshikhsya rezhimakh"], *Scientific Journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University"*, No.6(53), pp. 16–19.

6. Petrushin, V. S., Yakimets, A. M., Kalenik, O. V. (2008), "Heat calculations features of adjustable-speed induction motors in transient modes" ["Osobennosti teplovykh raschetov neustanovivshikhsya rezhimov raboty reguliruemyykh asinkhronnykh dvigateley"], *Electrical machine-building and electrical equipment : Interagency Scientific and Technical Collection* ", No.71, pp. 47–51.

7. Petrushin, V. S. (2006), Textbook. Induction motors in adjustable electric drive [Uchebnoe posobie. Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivoде], Science and Technology Publ. Odessa. 320 p.

8. M. Kotsur, I. Kotsur, Y. Bezverkhnia and D. Andrienko (2017), "Increasing of thermal reliability of a regulated induction motor in non-standard cycle time conditions," *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, pp. 88–91, doi: 10.1109/MEES. 2017.8248960.

9. Petrushin, V. S., Rjabinin, S. V., Jakimec, A. M. (2001), "The software product "DIMAS Drive". The program of analysis of work, selection and design of asynchronous squirrel-cage motors of variable speed drive systems (evidence of a PA program registration number 4065) " [Programmnyy produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinhronnykh korotkozamknutykh dvigateley sistem reguliruemogo jel-ektroprivoда (svidetel'stvo o registracii programmy PA№4065. CD)], Gosudarstvennyy departament intellektual'noj sobstvennosti, Kiev.

THERMAL STATE ANALYSIS OF ADJUSTABLE SPEED INDUCTION MOTOR

V. Petrushin¹, Y. Plotkin², A. Yakimets¹, R. Yenoktaiev¹¹Odessa National Polytechnic University²Berlin School of Economics and Law

Abstract. An equivalent thermal circuit is presented, which makes it possible to analyze the thermal state of a speed-controlled induction motor fed by a PWM voltage-source inverter in static and dynamic modes. It is taken into account that the losses in the structural elements of the engine and thermal conductivity, the values of which depend on the speed, change at different points of the control range. The temperatures of seven structural elements of the machine are determined: the stator steel package, the groove part of the stator winding, the rotor, the frame, the internal air, the end shields, and the frontal part of the stator winding. Theoretical and experimental studies of thermal indicators - the temperature of the stator winding frontal part and the temperature of the bearing shield of the AIP71A2 induction motor with self-cooling were carried out. The temperature characteristics are determined, which are the dependences of the overheating of the structural parts of a frequency-controlled induction motor on the load torque for different frequencies of the supply voltage. These characteristics are compared with those obtained from thermal experiments. Non-stationary heat calculations are performed by solving a system of differential heat balance equations. The transition to temperature control characteristics has been completed. Thermodynamic processes are considered theoretically and experimentally during the operation of a controlled drive at a given tachogram. Thermodynamic characteristics are determined by load tachograms and can be plotted for different intermittent modes.

Keywords: adjustable speed induction motor, equivalent thermal circuit, frequency control, overheating of the stator winding, overheating of the bearing, thermodynamic processes, experimental studies.

АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО СТАНУ РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

В. С. Петрушин¹, Ю. Р. Плоткін², А. М. Якімець¹, Р. М. Єноктаєв¹¹Одеський національний політехнічний університет²Берлінська вища школа економіки та права

Анотація. Представлено еквівалентну теплову схему, що дає можливість проводити аналіз теплового стану регульованого асинхронного двигуна в статичних і динамічних режимах. Враховується, що втрати в конструктивних елементах двигуна і теплові провідності, значення яких залежать від частоти обертання, змінюються в різних точках діапазону регулювання. Визначаються температури семи конструктивних елементів машини: пакета сталі статора, пазової частини обмотки статора, ротора, станини, внутрішнього повітря, підшипникових щитів, лобової частини обмотки статора. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження теплових показників - температури лобової частини обмотки статора і температури підшипникового щита асинхронного двигуна AIP71A2U3 з самоохолодженням при живленні його в регульованому електроприводі від частотного перетворювача. Визначено сімейства температурних характеристик, що представляють собою залежності перегрівів конструктивних частин частотно-регульованого асинхронного двигуна від моменту навантаження для різних частот живлячої напруги. Ці характеристики зіставлено з аналогічними характеристиками, що отримані в результаті теплових експериментів. Нестационарні теплові розрахунки виконуються рішенням системи диференціальних рівнянь теплового балансу. Виконано перехід до температурних регульовальних характеристик. Теоретично і експериментально розглянуто термодинамічні процеси при роботі регульованого приводу на задану тахограму. Термодинамічні характеристики визначаються тахографами навантаження і можуть бути побудовані для різних переміжних режимів. Запропонована методика аналізу теплового стану асинхронного двигуна, що працює в складі регульованого електроприводу, може бути використана для вибору або проектування двигуна для такого приводу.

Ключові слова: регульований асинхронний двигун, еквівалентна теплова схема, частотне управління, перегрів обмотки статора, перегрів підшипника, термодинамічні процеси, експериментальні дослідження.

Получено 14.04.2020



Петрушин Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (048)734-8494, E-mail: victor_petrushin@ukr.net

Viktor Petrushin, Sc.D., Professor of Electric Machines Department, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, ph.(048)734-8494, E-mail: victor_petrushin@ukr.net

ORCID ID: 0000-0003-2659-126X



Плоткин Юрий Романович, кандидат технических наук, профессор, HWR Berlin, 10315, Берлин, Альт Фридрихсфельде 60, тел. +49 (0)30 30877-2443, E-mail: juriy.plotkin@hwr-berlin.de

Juriy Plotkin, Ph.D., Professor, HWR Berlin, 10315 Berlin, Alt Friedrichsfelde 60, ph. +49 (0)30 30877-2443, E-mail: juriy.plotkin@hwr-berlin.de

ORCID ID: 0000-0001-9257-5933



Якимец Андрей Миронович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электрических машин Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, E-mail: yakimets_andriy@ukr.net

Andrei Yakimets, Ph.D, Associate Professor, Head of Electric Machines Department, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, E-mail: yakimets_andriy@ukr.net

ORCID ID: 0000-0002-0740-9154



Еноктаев Ростислав Николаевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, E-mail: rostik-enok@ukr.net

Rostislav Yenoktaiev, Ph.D, Senior Lecturer of Electric Machines Department, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, E-mail: rostik-enok@ukr.net

ORCID ID: 0000-0003-1577-9822