

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ УЗЛОВ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАГРУЗКИ И ТИПА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Розроблена еквівалентна теплова схема, на базі якої складена система рівнянь теплового балансу частотно-керованого асинхронного двигуна. За допомогою системи рівнянь розраховані і експериментально підтверджені температури обмоток і осердь статора і ротора асинхронного двигуна АИР 90В2. Встановлено залежність температури найбільш нагрітих вузлів машини від величини навантаження при різних формах напруги живлення.

Разработана эквивалентная тепловая схема, на базе которой составлена система уравнений теплового баланса частотно-управляемого асинхронного двигателя. С помощью системы уравнений рассчитаны и экспериментально подтверждены температуры обмоток и сердечников статора и ротора асинхронного двигателя АИР 90В2. Установлена зависимость температуры наиболее нагретых узлов машины от величины нагрузки при разных формах питающего напряжения.

Введение. Применение в народном хозяйстве регулируемых электроприводов (РЭП) на базе асинхронных двигателей (АД) позволяет экономить электроэнергию, дает возможность разрабатывать и внедрять новые технологические процессы и улучшать энергетический коэффициент ($\eta \cdot \cos\phi$) привода в целом. Питание асинхронных частотно-управляемых двигателей (АЧУД) осуществляется преобразователями частоты, которые в значительной мере влияют на технико-экономические показатели регулируемого электропривода. В качестве источников питания для регулируемых электроприводов применяют полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ) с использованием широко-импульсной модуляции (ШИМ), обеспечивающие синусоидальное выходное напряжение с переменной скважностью длительности импульсов (Режим Б). В то же время в эксплуатации находится большое количество РЭП, у которых питание двигателей осуществляется ППЧ с автономным инвертором напряжения (ППЧ с АИН) со ступенчатой формой напряжения на выходе (Режим А).

Питание АЧУД напряжением ступенчатой формы (ППЧ с АИН) приводит к росту дополнительных потерь от высших гармоник напряжения (ВГН), которые существенно влияют на нагрев двигателя. При работе АЧУД в его объеме выделяется теплота, источников которой являются потери энергии, возникающие в процессе электромеханического преобразования. Теплота, образуемая в активных элементах, распространяется по всему объему машины и передается в охлаждающую среду с помощью системы охлаждения. Таким образом, в объеме машины существуют тепловые потоки и перепады температуры между отдельными узлами конструкции.

Температура узлов АЧУД в зависимости от нагрузки и типа источника питания. Режимы работы АЧУД характеризуется типом источника питания, величиной нагрузки и частотой вращения, которые определяют электрические, магнитные и механические потери, а также состояние окружающей среды и условия теплообмена с ней [1]. Проведение исследования [2] показали, что при использовании АД общего назначения в качестве АЧУД и ППЧ с АИН мощность двигателя уменьшится на 15-20 %.

Для анализа температуры узлов в АЧУД используется тепловая эквивалентная схема (ЭТС) [3], разбитая до 16 узлов [4] (рис. 1).

Для всех узлов ЭТС составлены уравнения теплового баланса

$$\begin{aligned}
 1. & \theta_1 \cdot (\lambda_{0.1} + \lambda_{1.2} + \lambda_{1.10}) - \theta_2 \cdot \lambda_{1.2} - \theta_{10} \cdot \lambda_{1.10} = \\
 & = \theta_{01} \cdot \lambda_{0.1}; \\
 2. & -\theta_1 \cdot \lambda_{1.2} + \theta_2 \cdot (\lambda_{0.2} + \lambda_{1.2} + \lambda_{2.6}) - \theta_3 \cdot \lambda_{2.3} - \\
 & - \theta_6 \cdot \lambda_{2.6} = \theta_{02} \cdot \lambda_{0.2}; \\
 3. & -\theta_2 \cdot \lambda_{2.3} + \theta_3 \cdot (\lambda_{0.3} + \lambda_{2.3} + \lambda_{3.11}) - \theta_{11} \cdot \lambda_{3.11} = \\
 & = \theta_{03} \cdot \lambda_{0.3}; \\
 4. & \theta_4 \cdot (\lambda_{4.5} + \lambda_{4.7} + \lambda_{4.14}) - \theta_5 \cdot \lambda_{4.5} - \theta_7 \cdot \lambda_{4.7} - \\
 & - \theta_{14} \cdot \lambda_{4.14} = P_4; \\
 5. & -\theta_4 \cdot \lambda_{4.5} + \theta_5 \cdot (\lambda_{4.5} + \lambda_{5.6} + \lambda_{5.7}) - \theta_6 \cdot \lambda_{5.6} - \\
 & - \theta_7 \cdot \lambda_{5.7} = 0; \\
 6. & -\theta_2 \cdot \lambda_{2.6} - \theta_5 \cdot \lambda_{5.6} - \theta_6 \cdot (\lambda_{2.6} + \lambda_{5.6}) = P_6; \\
 7. & -\theta_4 \cdot \lambda_{4.7} + \theta_7 \cdot (\lambda_{7.8} + \lambda_{4.7} + \lambda_{5.7} + \lambda_{7.9}) - \\
 & - \theta_8 \cdot \lambda_{7.8} - \theta_9 \cdot \lambda_{7.9} = P_7; \\
 8. & -\theta_7 \cdot \lambda_{7.8} + \theta_8 \cdot (\lambda_{7.8} + \lambda_{8.10}) - \theta_{10} \cdot \lambda_{8.10} = P_8; \\
 9. & -\theta_7 \cdot \lambda_{7.9} + \theta_9 \cdot (\lambda_{7.9} + \lambda_{9.11}) - \theta_{11} \cdot \lambda_{9.11} = P_9; \\
 10. & -\theta_1 \cdot \lambda_{1.10} - \theta_8 \cdot \lambda_{8.10} + \theta_{10} \cdot (\lambda_{1.10} + \lambda_{8.10} + \lambda_{10.12} + \\
 & + \lambda_{10.14} + \lambda_{10.15}) - \theta_{12} \cdot \lambda_{10.12} - \theta_{14} \cdot \lambda_{10.14} - \\
 & - \theta_{15} \cdot \lambda_{10.15} = P_{10}; \\
 11. & -\theta_3 \cdot \lambda_{3.11} - \theta_9 \cdot \lambda_{9.11} + \theta_{11} \cdot (\lambda_{3.11} + \lambda_{9.11} + \lambda_{11.13} + \\
 & + \lambda_{11.14} + \lambda_{11.15}) - \theta_{13} \cdot \lambda_{11.13} - \theta_{14} \cdot \lambda_{11.14} - \\
 & - \theta_{15} \cdot \lambda_{11.15} = P_{11}; \\
 12. & -\theta_{10} \cdot \lambda_{10.12} + \theta_{12} \cdot (\lambda_{10.12} + \lambda_{12.0}) = P_{12} + \theta_{01} \cdot \lambda_{12.0}; \\
 13. & -\theta_{11} \cdot \lambda_{11.13} + \theta_{13} \cdot (\lambda_{11.13} + \lambda_{13.0}) = P_{13} + \theta_{01} \cdot \lambda_{13.0}; \\
 14. & -\theta_4 \cdot \lambda_{4.14} - \theta_{10} \cdot \lambda_{10.14} - \theta_{11} \cdot \lambda_{11.14} + \theta_{14} \cdot (\lambda_{4.14} + \\
 & + \lambda_{10.14} + \lambda_{11.14} + \lambda_{14.16}) - \theta_{16} \cdot \lambda_{14.16} = P_{14}; \\
 15. & -\theta_{10} \cdot \lambda_{10.15} - \theta_{11} \cdot \lambda_{11.15} + \theta_{15} \cdot (\lambda_{10.15} + \lambda_{11.15} + \\
 & + \lambda_{15.16}) - \theta_{16} \cdot \lambda_{15.16} = 0; \\
 16. & -\theta_{14} \cdot \lambda_{14.16} - \theta_{15} \cdot \lambda_{16.15} + \theta_{16} \cdot (\lambda_{14.16} + \lambda_{16.15}) = P_{16}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Принимаем: $\theta_{01} = \theta_{\text{окр}}$; $\theta_{02} = \theta_{01} + \Delta\theta_{\text{в}}/2$; $\theta_{03} = \theta_{01} + \Delta\theta_{\text{в}}$, где $\theta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды. Значения θ_{02} , θ_{03} для всех рассматриваемых законов регулирования двигателя АИР90В2 при $0,5 \leq \alpha \leq 1$ и $1 \leq \alpha \leq 1,5$ приведены в табл. 1.

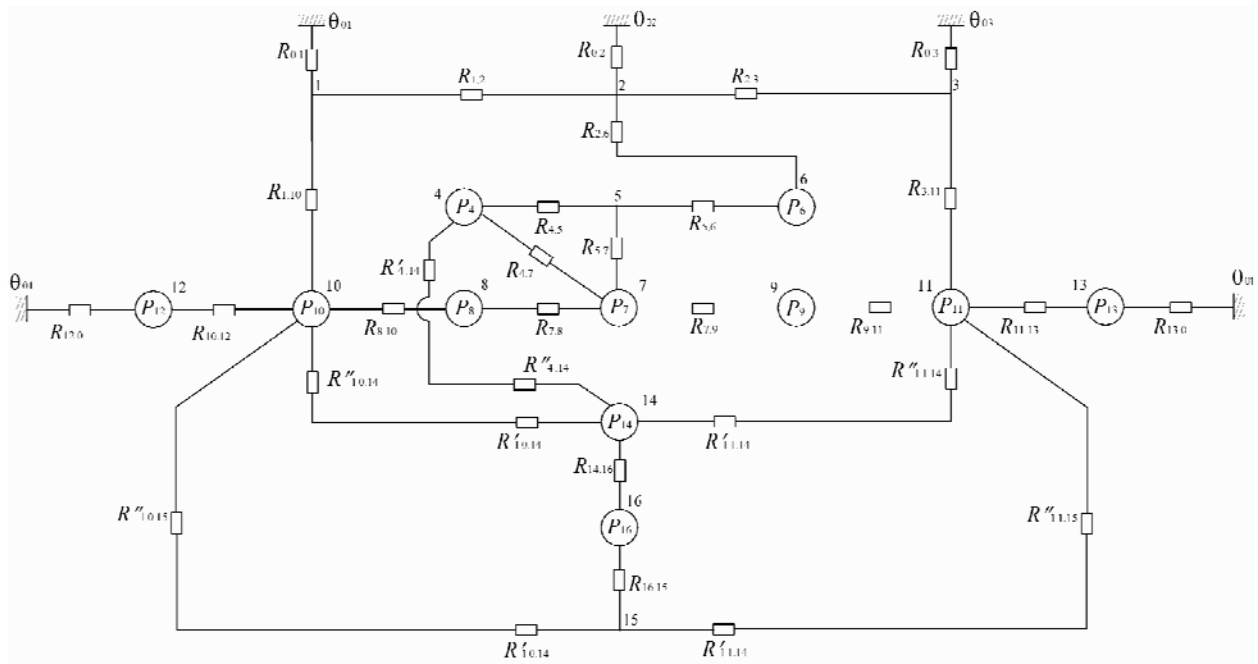


Рис. 1. ЭТС частотно-управляемого асинхронного двигателя

Таблица 1

Значения температуры охлаждающего воздуха для всех рассматриваемых законов регулирования °C

Закон	α						
	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
$\gamma = \alpha \frac{\Theta_{02}}{\Theta_{03}}$	36,7° 48,4°	33,2° 41,5°	31,6° 38,2°	30,9° 36,8°	-	-	-
$\gamma = \alpha^2 \frac{\Theta_{02}}{\Theta_{03}}$	28,0° 31,2°	29,3° 33,4°	30,3° 35,7°	30,9° 36,8°	-	-	-
$\gamma = \sqrt{\alpha} \frac{\Theta_{02}}{\Theta_{03}}$	-	-	-	30,9° 36,8°	30,1° 35,6°	29,4° 32,8°	28,2° 31,4°
$\gamma = 1 \frac{\Theta_{02}}{\Theta_{03}}$ $P_2 = \text{const}$	-	-	-	30,9° 36,8°	30,2° 35,4°	29,5° 34,0°	29,2° 33,5°

Температура узлов ЭТС определяется, решая систему уравнений. При ступенчатой форме питающего напряжения (ППЧ с АИН) в сердечнике ротора возникают магнитные потери от высших гармоник (Режим А), существенно изменяются собственные и взаимные тепловые проводимости узлов ротора (обмотка ротора 14, сердечник ротора 16). В обмотке статора, зубцах и спинке сердечника за счет высших гармонических растут основные и дополнительные потери мощности (7 – активная часть обмотки статора, 8, 9 – лобовая часть обмотки соответственно со стороны привода и вентилятора).

Расчетные и экспериментальные данные температуры наиболее нагретых узлов двигателя АИР90В2 при работе с режимом питания А и Б представлены на рис. 2, 3.

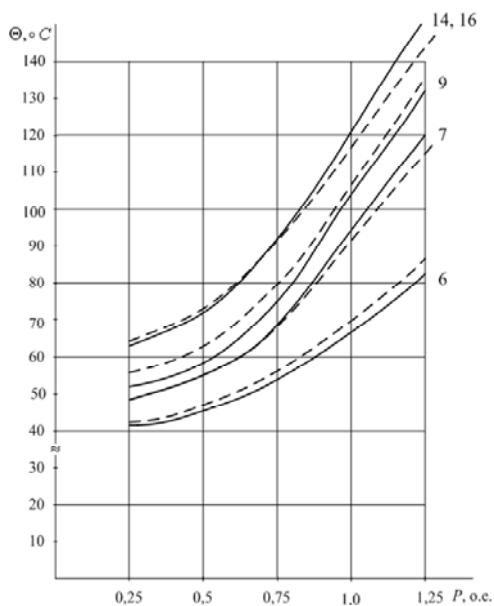


Рис. 2. Зависимость температуры обмоток и сердечников от P_2 . Режим А ($\gamma = \alpha = 1,0$).
Сплошная линия – эксперимент, пунктирная – расчет

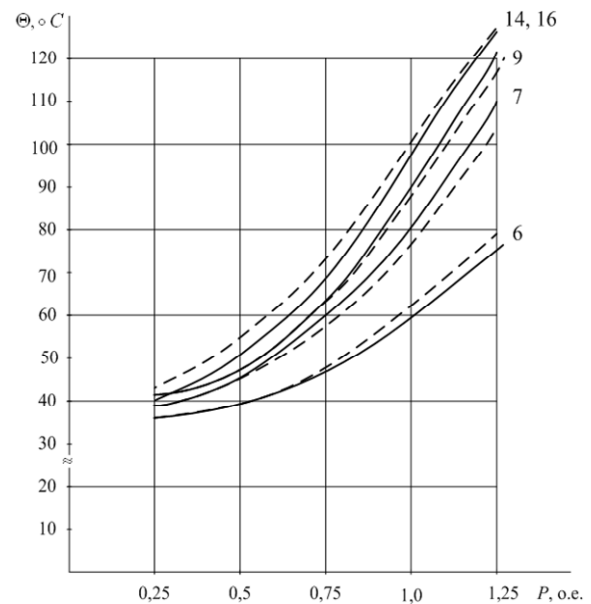


Рис. 3. Зависимость температуры обмоток и сердечников от P_2 . Режим Б ($\gamma = \alpha = 1,0$).
Сплошная линия – эксперимент, пунктирная – расчет

Выводы.

1. Дополнительные потери в узлах статора и ротора от высших гармоник существенно влияют на их температуру и при работе в режимах А и Б составляют 70 % основных потерь.

2. С ростом нагрузки двигателя влияние дополнительных потерь существенно снижается и для обмотки статора при $P_2 = 1,0 \cdot P_{2N}$ составляет 11,3 %, для обмотки ротора 45 %.

3. Распределение температуры по длине двигателя несимметрично и наибольшая неравномерность наблюдается для оребренного корпуса, при этом неравномерность распределения примерно одинакова для обеих форм питающего напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Шукин В.К. Термодинамика и теплопередача. – М: Высшая школа, 1975. – 495 с.
2. Петрушин В.С. Энергетические и тепловые показатели регулируемых асинхронных двигателей с учетом высших пространственно-временных гармоник // *Электромашиностроение та електрообладнання*. – 2008. – №70. – С. 68-71.
3. Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
4. Петренко А.Н., Таянский В.В., Петренко Н.Я. Температурное поле и тепловые потоки частотно-управляемого асинхронного двигателя // *Вестник НТУ "ХПИ"*. – 2012. – №49. – С. 61-65.

Bibliography (transliterated): 1. Bolgarskiy A.V., Muhachev G.A., Shchukin V.K. *Termodinamika i teploperedacha*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 495 p. 2. Petrushin V.S. *Jenergeticheskie i teplovyje pokazateli reguliruemyh asinhronnyh dvigatelej s uchetom vysshih*

prostranstvenno-vremennyh garmonik. Elektromashynobuduvannya ta elektroobladnannya, 2008, no.70, pp. 68-71. 3. Borisenko A.I., Dan'ko V.G., Yakovlev A.I. *Aerodinamika i teploperedacha v elektricheskij mashinah*. Moscow, Energiya Publ., 1974. 560 p. 4. Petrenko A.N., Tanyanskiy V.V., Petrenko N.Ya. *Temperaturnoe pole i teplovyje potoki chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja. Bulletin of NTU "KhPI"*, 2012, no.49, pp. 61-65.

Postynula (received) 18.10.2013

*Вакарюк Тарас Вячеславович¹, студент,
Петренко Николай Яковлевич¹, к.т.н., доц.,
Петренко Александр Николаевич², к.т.н.,
¹Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
e-mail: mvikri@kpi.kharkov.ua,*

*²Харьковский национальный университет
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
61002, Харьков, ул. Революции, 12*

*T.V. Vakaruk¹, N.Ya. Petrenko¹, A.N. Petrenko²
¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine*

*²O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy
12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine*

Study of frequency-controlled asynchronous motor units temperature versus load and power supply type.

An equivalent thermal circuit is developed to form the basis of a system of heat-balance equations for a frequency-controlled induction motor. With the system of equations, temperatures of АИР 90В2 induction motor stator and rotor windings and cores are calculated and experimentally confirmed. The load dependence of the machine most heated units temperature at different forms of the supply voltage is revealed.

Key words – inverter, frequency-controlled asynchronous motor, losses, loads, high harmonics, temperature.