

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Проведено дослідження теплового стану частотно-керованого асинхронного двигуна методом кінцевих елементів. Виконано порівняння результатів розрахунку теплового стану частотно-керованого асинхронного двигуна, що отримані методом кінцевих елементів і методом еквівалентних теплових схем.

Проведено исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя методом конечных элементов. Выполнено сравнение результатов расчета теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя, полученных методом конечных элементов и методом эквивалентных тепловых схем.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность и долговечность асинхронных частотно-управляемых двигателей (АЧУД) в значительной мере определяется их тепловым состоянием. По сравнению с нерегулируемыми асинхронными двигателями тепловое состояние АЧУД осложняется наличием дополнительных потерь от высших гармоник напряжения (ВГН) при питании от ППЧ с АИН и существенным снижением эффективности системы охлаждения при работе в нижней части диапазона регулирования, т.е. при частотах вращения ниже номинальной и способе охлаждения IC0141. Таким образом, тепловой расчет АЧУД на стадии проектирования с учетом всех особенностей их работы [1-3] представляется весьма актуальным.

В настоящее время для этих целей используют надежный и апробированный метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС), однако, возможно использование и численных методов, в частности метода конечных элементов (МКЭ). Для расчета двумерных стационарных температурных полей часто используют программу FEMM [4]. Для решения поставленной задачи будем использовать именно эту программу.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ДВУХМЕРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Основой расчета двумерного стационарного температурного поля МКЭ является общее дифференциальное уравнение теплопроводности, которое в декартовой системе координат имеет вид [5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(r \cdot \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} r \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = q, \quad (1)$$

с граничными условиями, учитывающими конвективный теплообмен:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} e_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} e_y - \alpha \cdot (T - T_{oc}) = 0, \quad (2)$$

при граничных условиях первого рода:

$$T|_x = T^*, \quad (3)$$

при граничных условиях второго рода для симметричных полей:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_0 = 0. \quad (4)$$

Уравнение (1) с граничными условиями (2) – (4)

есть математическая модель теплового состояния АЧУД при использовании МКЭ [5]. В результате решения уравнения (1) с граничными условиями (2) – (4) определяется искомое температурное поле для поперечного сечения исследуемого АЧУД.

Таким образом, дифференциальное уравнение теплопроводности и граничные условия могут рассматриваться как математическая модель теплового состояния двигателя при использовании метода конечных элементов.

В выражениях (1) – (4) приняты следующие обозначения: r – средний радиус-вектор; λ_x, λ_y – коэффициенты теплопроводности в текущей точке расчетной области в направлении осей x, y соответственно; $T(x, y)$ – искомая функция распределения температуры; q – объемная плотность источников тепла; e_x, e_y – направляющие косинусы нормали теплоотдающей поверхности по отношению к осям x, y ; α – коэффициент теплоотдачи конвекцией с теплоотдающей поверхности в окружающий воздух; T_{oc} – температура окружающего воздуха; n – нормаль к теплоотдающей поверхности; $T|_x$ – температура на границе расчетной области; T^* – известное значение температуры на границе расчетной области.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассматривается асинхронный двигатель типа АИР160S4 с номинальными данными: $P_N = 15$ кВт, $U_{SN} = 380$ В, $f_{SN} = 50$ Гц, $n_N = 1476$ об/мин, степень защиты IP44, способ охлаждения IC0141. Поперечное сечение двигателя соответствует середине сердечника статора и представлено на рис. 1.

ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Имея целью сравнение результатов расчета теплового состояния АЧУД по методу ЭТС и по МКЭ, набор вариантов режимов работы двигателя должен соответствовать программе исследований по методу ЭТС и отражать главные особенности АЧУД:

- регулирование частоты вращения в широком диапазоне, что предопределило выбор значений коэффициента регулирования: $\alpha = 0,5$; $\alpha = 1,0$; $\alpha = 1,5$, где $\alpha = f_s/f_{sN}$;
- регулирование частоты вращения осуществля-

ется при заданной функциональной зависимости частоты вращения и величин момента на валу и полезной мощности двигателя, что обеспечивается реализацией режимов определяемых рассматриваемыми законами частотного регулирования [2]: $\gamma = \alpha$; $\gamma = \alpha^2$; $\gamma = \sqrt{\alpha}$; $\gamma = 1,0 = \text{const}$; $P_N = \text{const}$; где $\gamma = U_s/U_{sN}$.

– влияние дополнительных потерь от ВГН, что достигается реализацией двух режимов питания: режим Б – питание синусоидальным напряжением, режим А – питание напряжением ступенчатой формы, т.е. питание от ППЧ с АИН.

В соответствии с изложенным в дальнейшем рассмотрим следующие режимы работы АЧУД:

1. $\gamma = \alpha$; $\alpha = 1,0$; режим питания Б.
2. $\gamma = \alpha$; $\alpha = 1,0$; режим питания А.
3. $\gamma = \alpha$; $\alpha = 0,5$; режим питания А.
4. $\gamma = \alpha^2$; $\alpha = 0,5$; режим питания А.
5. $\gamma = \sqrt{\alpha}$; $\alpha = 1,5$; режим питания А.

6. $\gamma = 1,0 = \text{const}$; $P = P_N = \text{const}$; $\alpha = 1,5$; режим питания А.

Результаты расчета теплового состояния двигателя в режимах 1 и 2 дают представленные о влиянии дополнительных потерь от высших гармоник $\Sigma P_{\text{допв}}$ на температурное поле двигателя, а сочетание результатов расчета в режимах 3, 4, 2, 5, 6 – о влиянии изменения частоты вращения при различных законах регулирования.

Геометрическая модель исследуемого асинхронного двигателя АИР160S4 созданная в программе FEMM представлена на рис. 1 и содержит 129376 узлов и 61941 элемент расчетных областей.

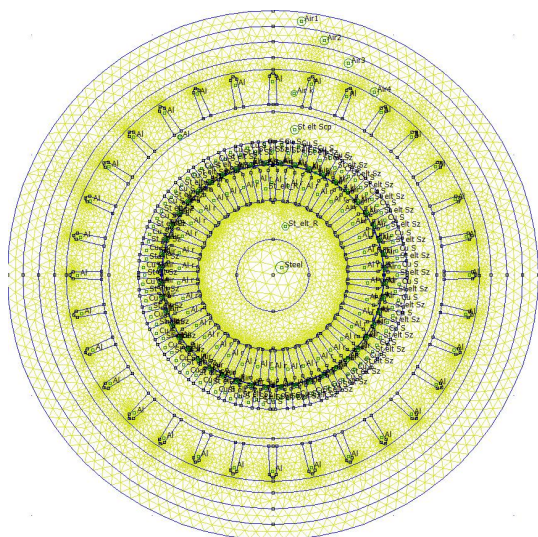


Рис. 1. Геометрическая модель исследуемого двигателя с генерированной сеткой

Теплотехнические параметры элементов конструкции двигателя в поперечном сечении: коэффициенты теплопроводности оребренного корпуса и обмотки ротора, шихтованных пакетов сердечников статора и ротора, пазового клина, вала – 150; 34; 0,25; 48 Вт/м·град соответственно. Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки статора вдоль и поперек паза – 0,38 Вт/м·град. Коэффициенты теплопро-

водности воздуха в зазоре и воздуха в межреберных каналах задавались в соответствии с температурами определенными при расчете по методу ЭТС.

Объемные плотности источников тепла по элементам расчетной области определялись по результатам расчета основных и дополнительных потерь о ВГН, при этом расчет всех составляющих потерь проводился в соответствии с [6]. В качестве примера, в табл. 1 приведены значения объемных плотностей тепловыделяющих элементов конструкции двигателя в режимах 1 и 2.

Таблица 1

Элемент конструкции двигателя	Объемная плотность источника тепла, Вт/м ³	
	Режим работы 1	Режим работы 2
Пазовая часть обмотки статора	905707	1007444
Зубцы сердечника статора	170588	173529
Спинка сердечника статора	127668	130890
Пазовая часть обмотки ротора	404191	584830
Сердечник ротора	0	3184

Применительно к условиям поставленной задачи необходимые граничные условия определялись по результатам расчета теплового состояния двигателя по методу ЭТС [1-3]. В перечень граничных условий для каждого из шести режимов работы входят температуры воздуха в воздушном зазоре и в межреберных каналах, температура окружающей среды, коэффициенты теплоотдачи от поверхности ротора в воздушный зазор – α_6 и от оребренного корпуса в охлаждающий воздух – α_k . Дополнительно вокруг оребренного корпуса введены концентрические воздушные зоны для обеспечения плавности снижения температуры охлаждающего воздуха. В зонах задано равномерное распределение температуры таким образом, чтобы на наружной границе последней зоны получить температуру равную температуре окружающей среды. Высота зон определялась на основе известных данных о рассеянии воздуха из межреберных каналов. На границах зон задавались граничные условия первого рода с температурой соответствующей конкретному режиму работы двигателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты расчета температурных полей для всех режимов работы приведены на рис. 2-7.

Метод ЭТС позволяет определить средние температуры элементов конструкции двигателя (узлов ЭТС). В связи с этим, для сравнения результатов расчета по методу ЭТС и по МКЭ необходимо на основе температурных полей рис. 2-7 определить средние температуры расчетных областей – элементов конструкции. Результаты расчета температур приведены в табл. 2-4.

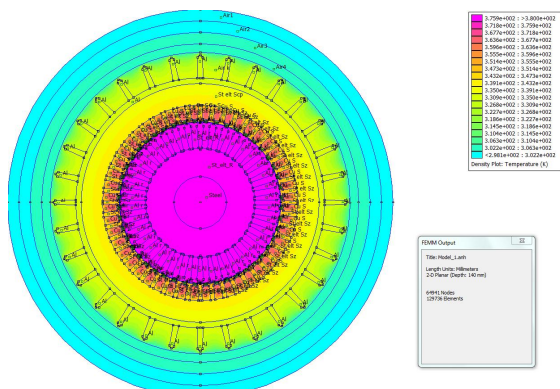


Рис. 2. Температурное поле двигателя в режиме 1
($\gamma = \alpha = 1,0$. Режим питания Б)

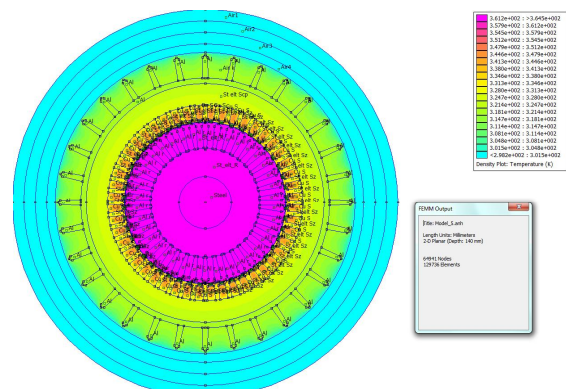


Рис. 6. Температурное поле двигателя в режиме 5
($\gamma = \sqrt{\alpha}$; $\alpha = 1,5$. Режим питания А)

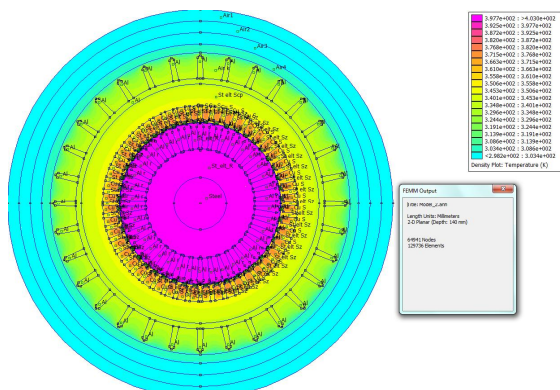


Рис. 3. Температурное поле двигателя в режиме 2
($\gamma = \alpha = 1,0$. Режим питания А)

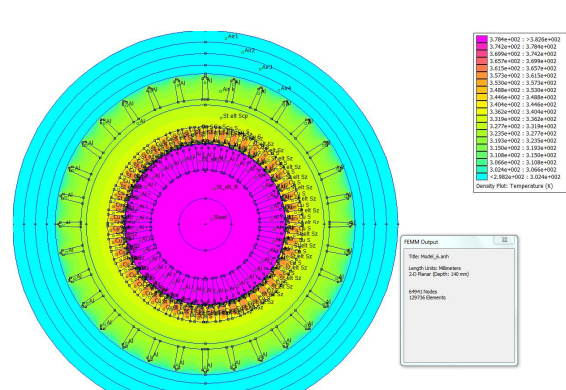


Рис. 7. Температурное поле двигателя в режиме 6
($\gamma = 1 = \text{const}$; $\alpha = 1,5$. Режим питания А)

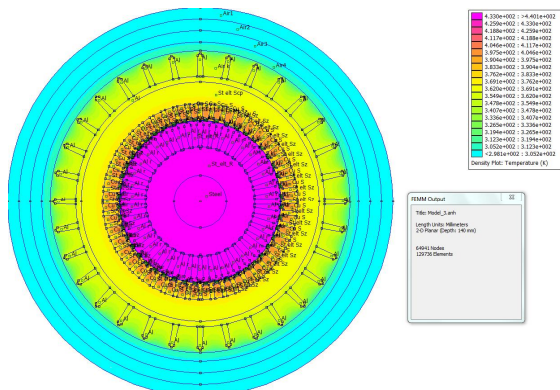


Рис. 4. Температурное поле двигателя в режиме 3
($\gamma = \alpha$; $\alpha = 0,5$. Режим питания А)

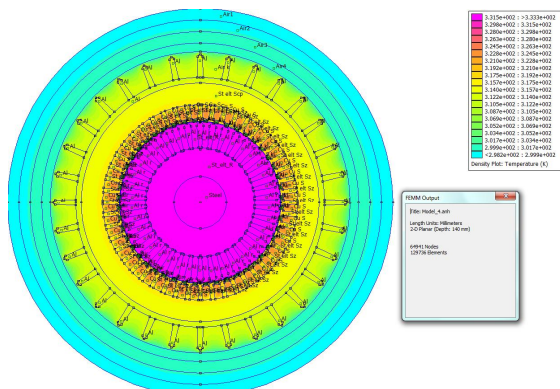


Рис. 5. Температурное поле двигателя в режиме 4
($\gamma = \alpha^2$; $\alpha = 0,5$. Режим питания А)

Таблица 2

Элемент конструкции двигателя	Температура, °С			
	Режим работы 1		Режим работы 2	
	МКЭ	ЭТС	МКЭ	ЭТС
Пазовая часть обмотки ротора	106,6	104,1	129,3	127,4
Сердечник ротора	106,5	102,9	129,8	126,9
Пазовая часть обмотки статора	83,9	87,3	90,5	96,3
Зубцы сердечника статора	75,7	72,4	82,2	79,4
Спинка сердечника статора	65,4	63,2	70,2	68,4
Корпус	58,6	55,4	64,2	59,4

Таблица 3

Элемент конструкции двигателя	Температура, °С			
	Режим работы 3		Режим работы 4	
	МКЭ	ЭТС	МКЭ	ЭТС
Пазовая часть обмотки ротора	166,5	172,8	60,1	60,7
Сердечник ротора	166,4	172,2	60,1	60,5
Пазовая часть обмотки статора	116,1	117,1	47,4	47,7
Зубцы сердечника статора	106,8	97,1	45,1	42,6
Спинка сердечника статора	93,8	85,7	41,95	39,9
Корпус	87,6	77,1	40,1	37,8

Таблица 4

Элемент конструкции двигателя	Температура, °С			
	Режим работы 5		Режим работы 6	
	МКЭ	ЭТС	МКЭ	ЭТС
Пазовая часть обмотки ротора	91	86,6	109,1	103,7
Сердечник ротора	90,9	86,3	109,5	103,2
Пазовая часть обмотки статора	64,7	69,2	77,1	83,5
Зубцы сердечника статора	59,5	58,9	68,94	67,7
Спинка сердечника статора	51,4	51,1	58	57,3
Корпус	46,9	44,2	52,4	48,8

ВЫВОДЫ

1. Результаты расчета температурного поля исследуемого двигателя МКЭ подтверждают характер распределения температурного поля и закономерности его изменения при различных законах регулирования.

2. Среднее отличие результатов расчета по МКЭ и по методу ЭТС, по всем элементам конструкции и всем шести режимам работы, составляет 4,29 %, что свидетельствует об адекватности математических моделей теплового состояния полученных по методу ЭТС и МКЭ.

3. МКЭ в применении к расчету температурного поля двигателя требует информационной поддержки в части граничных условий, что может быть обеспечено применением метода ЭТС при достаточно развитой структуре эквивалентной тепловой схемы в аксиальном и радиальном направлениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осташевский, Н.А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах [Текст] / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Тематич. вып. науч-техн. журнала "Электротехника и электромеханика". – 2009. – С. 266-270.
2. Осташевский, Н.А. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования [Текст] / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Вестник НТУ "ХПИ". – 2010. – № 16. – С. 89-102.
3. Осташевский, Н.А. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки [Текст] / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Электротехника і електромеханіка. – 2010. – № 3. – С. 25-29.
4. David Meeker. User's Manual. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. / David Meeker // source <http://www.femm.info/Archives/doc/manual> 42.pdf.

5. Рымша, В.В. Расчет двухмерного стационарного теплового поля вентильно-реактивного двигателя методом конечных элементов [Текст] / В.В. Рымша, З.П. Процына, П.А. Кравченко // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 26-28.

6. Осташевский, Н.А. Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя в при различных законах регулирования и типах преобразователей [Текст] / Н.А. Осташевский, В.Н. Иваненко, А.Н. Петренко // Электротехника и электромеханика. – 2009. – № 3. – С. 37-41.

Bibliography (transliterated): 1. Ostashevskij, N.A. Matematicheskaya model' teplovogo sostoyaniya chastotno-upravlyаемого asinhronnogo dvigatelya v stacionarnykh rezhimakh [Tekst] / N.A. Ostashevskij, A.N. Petrenko // Problemy avtomatizirovannogo `elektroprivoda. Teoriya i praktika. Tematich. vyp. nauch-tehn. zhurnala "Elektroinform". - 2009. - S. 266-270. 2. Ostashevskij, N.A. Issledovanie teplovogo sostoyaniya chastotno-upravlyаемого asinhronnogo dvigatelya pri razlichnykh zakonah regulirovaniya [Tekst] / N.A. Ostashevskij, A.N. Petrenko // Vestnik NTU "HPI". - 2010. - № 16. - S. 89-102. 3. Ostashevskij, N.A. Issledovanie teplovogo sostoyaniya chastotno-upravlyаемого asinhronnogo dvigatelya pri izmenenii nagruzki [Tekst] / N.A. Ostashevskij, A.N. Petrenko // Elektrotehnika i elektromekhanika. - 2010. - № 3. - S. 25-29. 4. David Meeker. User's Manual. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. / David Meeker // source <http://www.femm.info/Archives/doc/manual> <<http://www.femm.info/Archives/doc/manual>> 42.pdf. 5. Rymsha, V.V. Raschet dvuhmernogo stacionarnogo teplovogo polya ventil'no-reaktivnogo dvigatel metodom konechnykh `elementov [Tekst] / V.V. Rymsha, Z.P. Procyna, P.A. Kravchenko // `Elektrotehnika i `elektromekhanika. - 2010. - № 4. - S. 26-28. 6. Ostashevskij, N.A. Poteri chastotno-upravlyаемого asinhronnogo dvigatelya v pri razlichnykh zakonah regulirovaniya i tipah preobrazovatelej [Tekst] / N.A. Ostashevskij, V.N. Ivanenko, A.N. Petrenko // `Elektrotehnika i `elektromekhanika. - 2009. - № 3. - S. 37-41.

Поступила 21.07.2011

Осташевский Николай Александрович, к.т.н., проф.,
Шайда Виктор Петрович, к.т.н., доц.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
каф. "Электрические машины"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
e-mail: viktorshayda08@rambler.ru

Петренко Александр Николаевич,
начальник расчетного отдела СКБ ХЭЛЗ "Укрэлектромаш"
61050, Харьков, ул. Искринская, 37

Ostashevskiy N.A., Shayda V.P., Petrenko A.N.

Research into thermal state of a frequency-controlled asynchronous motor by means of a finite element method.

Research into thermal state of a frequency-controlled asynchronous motor with a finite element method is conducted. Results obtained are compared with results of the motor thermal state calculation by means of an equivalent thermal scheme method.

Key words – frequency-controlled asynchronous motor, thermal state, finite element method.