

А.Н. ПЕТРЕНКО, инженер, "Укрэлектромаш", Харьков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статті розглянуті питання експериментального дослідження температурного поля частотно-керованого асинхронного двигуна при різних схемах живлення і різних законах регулювання. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність математичної моделі теплового стану двигуна в стаціонарному режимі. Побудовані температурні характеристики при різних напругах живлення.

В статье рассмотрены вопросы экспериментального исследования температурного поля частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных схемах питающего напряжения и различных законах регулирования. Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность математической модели теплового состояния двигателя в стационарном режиме. Построены температурные характеристики при различных законах регулирования.

Введение. Теоретические исследования температурного поля частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах работы выполняются на основании математической модели теплового состояния [1]. На основании этой модели для исследуемого двигателя АИР 90 L В4 с номинальными данными: $P_N = 2,5$ кВт, $U_{N\phi} = 220$ В, $f_N = 50$ Гц, $n_N = 1430$ об/мин, исполнение IP44, ICO 141 составлена система уравнений теплового баланса. Конвективные тепловые сопротивления во всех диапазонах регулирования определялись по [2].

В процессе экспериментального исследования в качестве источников питания использовался индуктивный генератор и автономный инвертор напряжения ([3] схема 1 и схема 2, соответственно). Напряжение и частота регулировались в пределах (110-220) В и (25-75) Гц, что позволило обеспечить законы регулирования при постоянном моменте $\gamma = \alpha$; $M = M_N = \text{const}$ (регулирования "вниз"), при постоянной мощности и неизвестном напряжении $\gamma = 1 = \text{const}$, $P_2 = P_N = \text{const}$ (регулирование "вверх"). При питании синусоидальным (схема 1) и ступенчатым (схема 2) напряжением основные и добавочные потери в двигателе определялись по [4].

Система уравнений теплового баланса, соответствующая ЭТС [1] для номинального режима при синусоидальной и ступенчатой форме питаю-

щего напряжения, приведены ниже. По аналогии с двигателями АИ 160 S4 отличие систем уравнений при питании по схемам 1 и 2 касаются правых частей и вариативной части тепловых проводимостей [5].

1. $10,971 \cdot \theta_1 - 4,2034 \cdot \theta_2 - 0,8332 \cdot \theta_{10} = 130,8$
2. $-4,2034 \cdot \theta_1 + 71,2636 \cdot \theta_2 - 4,2034 \cdot \theta_3 - 44,0528 \cdot \theta_6 = 483,3$
3. $-4,2034 \cdot \theta_2 + 71,2636 \cdot \theta_3 - 4,2034 \cdot \theta_{11} = 483,3$
4. $145,4966 \cdot \theta_4 - 131,5759 \cdot \theta_5 - 10,1112 \cdot \theta_7 - 3,8098 \cdot \theta_{14} = 50,0$
5. $-131,5759 \cdot \theta_4 + 370,9966 \cdot \theta_5 - 238,0952 \cdot \theta_6 - 1,3255 \cdot \theta_7 = 0$
6. $-44,0528 \cdot \theta_2 - 238,0952 \cdot \theta_5 + 282,1480 \cdot \theta_6 = 97,0$
7. $-10,1112 \cdot \theta_4 - 1,3255 \cdot \theta_5 + 25,2487 \cdot \theta_7 - 6,9060 \cdot \theta_8 - 6,9060 \cdot \theta_9 = 150,0$
8. $-6,9060 \cdot \theta_7 + 7,5508 \cdot \theta_7 - 0,6448 \cdot \theta_{10} = 73,9$
9. $-6,9060 \cdot \theta_7 + 7,5508 \cdot \theta_7 - 0,6448 \cdot \theta_{10} = 73,9$
10. $-0,8332 \cdot \theta_1 - 0,6448 \cdot \theta_8 + 2,9748 \cdot \theta_{10} - 0,6449 \cdot \theta_{12} - 0,7159 \cdot \theta_{14} - 0,1462 \cdot \theta_{15} = 4,8$
11. $-0,8332 \cdot \theta_3 - 0,6448 \cdot \theta_9 + 2,9748 \cdot \theta_{11} - 0,6349 \cdot \theta_{13} - 0,7159 \cdot \theta_{14} - 0,1462 \cdot \theta_{15} = 4,8$
12. $-0,6349 \cdot \theta_{10} - 1,6962 \cdot \theta_{12} = 27,6$
13. $-0,6349 \cdot \theta_{11} - 1,1773 \cdot \theta_{13} = 14,3$
14. $-3,8090 \cdot \theta_4 - 0,7159 \cdot \theta_{10} - 0,7159 \cdot \theta_{11} + 51,9569 \cdot \theta_{14} - 46,6853 \cdot \theta_{16} = 147,2$
15. $-0,1462 \cdot \theta_{10} - 0,1462 \cdot \theta_{11} + 79,6575 \cdot \theta_{15} - 79,3651 \cdot \theta_{16} = 0$
16. $-46,6853 \cdot \theta_{14} - 79,3651 \cdot \theta_{15} + 126,0504 \cdot \theta_{16} = 0$

Исследование температурного поля. Расчетным путем для всего диапазона частот вращения при двух законах регулирования определены температуры узлов ЭТС. Превышение температур узлов в элементах конструкции двигателя для режимов питания по схемам 1 и 2 приведены в табл. 1 и табл. 2, соответственно, там же приведены результаты экспериментальных исследований теплового состояния двигателя АИР 90 LB4. В узлы конструкции двигателя заложено 37 терморезисторов СТ-1-19 (схема размещения терморезисторов приведена в [3]).

Экспериментальные исследования подтвердили адекватность математической модели теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах. Таким образом, математическая модель может быть рекомендована для определения нагрева частотно-управляемых асинхронных двигателей исполнения

Таблица 1 – Расчетное и экспериментальное значение превышений температуры при питании по схеме 1

Режим питания Область двигателя	Схема 1					
	$\alpha=0,5$		$\alpha=1,0$		$\alpha=1,5$	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Пазовая часть обмотки статора	132,2	130,1	75,2	72,3	52,9	54,8
Лобовая часть обмотки статора (вентилятор)	142,9	140,6	82,2	78,3	95,7	59,3
Лобовая часть обмотки статора (привод)	143,3	144,6	84,4	81,9	60,1	62,2
Сердечник статора	88,2	91,3	43,5	44,6	30,8	31,1
Обмотка ротора	134,8	132,0	78,8	75,5	62,1	64
Внутренний воздух (вентилятор)	100,5	104,4	47,2	49,2	40,9	36,5
Внутренний воздух (привод)	104,6	110,2	53,1	55,0	42,4	40,8

Таблица 2 – Расчетное и экспериментальное значение превышений температуры при питании по схеме 2

Режим питания Область двигателя	Схема 2					
	$\alpha=0,5$		$\alpha=1,0$		$\alpha=1,5$	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Пазовая часть обмотки статора	146,0	146,3	83,3	84,7	62,4	61,8
Лобовая часть обмотки статора (вентилятор)	163,3	159,9	92,8	91,8	69,9	66,8
Лобовая часть обмотки статора (привод)	164,2	162,6	93,3	96,0	70,3	70,2
Сердечник статора	104,4	102,9	51,1	51,4	37,7	35,2
Обмотка ротора	152,6	147,8	101,0	97,9	77,8	75,8
Внутренний воздух (вентилятор)	112,3	115,6	63,8	60,1	43,8	41,8
Внутренний воздух (привод)	118,2	127,5	69,5	67,2	47,2	46,7

IP 44, ISO 141 при питании от регулируемого источника с синусоидальной и ступенчатой формой напряжения при различных законах регулирования частоты вращения.

Количество и место расположения датчиков в двигателе [3] позволило получить достоверную информацию о температурном поле. На основании этой информации получены температурные характеристики элементов конструкции, т.е. зависимости превышений температур от коэффициента регулирования $\Delta\theta = f(\alpha)$ при заданных законах регулирования.

Тепловые характеристики для пазовой части обмотки статора, сердечника статора, обмотки ротора при двух законах регулирования $\gamma = \alpha$, $M = M_N = \text{const}$ (регулирование "вниз") и $\gamma = 1$, $P_2 = P_N = \text{const}$ (регулирование "вверх") и двух типах источника питания (схема 1 и схема 2 [3]) представлены на рис. 1, 2, 3.

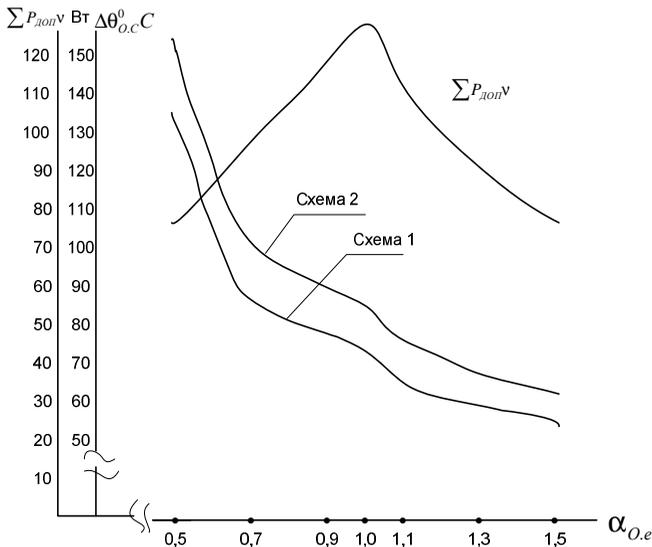


Рис. 1. Тепловая характеристика пазовой части обмотки статора $\Delta\theta_{o,c}^0 = f(\alpha)$.

Отличие тепловых характеристик при различных источниках питания обусловлены дополнительными электрическими и магнитными потерями от высших гармоник (питание по схеме 2).

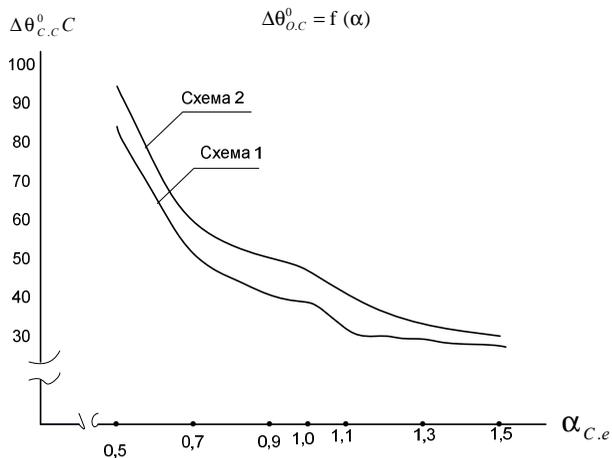


Рис. 2. Тепловая характеристика сердечника статора $\Delta\theta_{c.c.}^{\circ}C = f(\alpha)$.

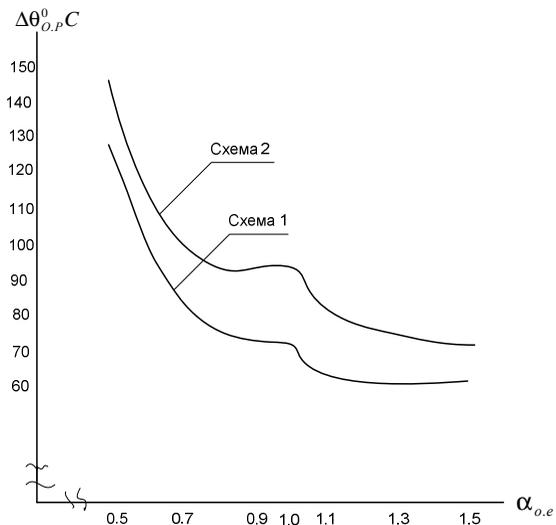


Рис. 3. Тепловая характеристика обмотки ротора $\Delta\theta_{o.p.}^{\circ}C = f(\alpha)$.

Дополнительные потери $P_{эл1.v}$ и $P_{эл2.v}$ составляют (94-96)%

$\sum P_{\text{доп}v}$ [5]. Зависимость $\sum P_{\text{доп}v} = f(\alpha)$ приведена на рис.1. Наиболее существенное влияние добавочные потери на тепловую характеристику обмотки ротора оказывают при $\alpha = 1,0$ (возникает локальный максимум). При увеличении α до 1,5 и уменьшении до α до 0,5 добавочные потери уменьшаются на 60% от своего значения при $\alpha = 1,0$. Тепловые характеристики обмотки и сердечника статора монотонны при изменении α в пределах $0,5 < \alpha < 1,5$. Уменьшение превышений температур обмотки статора – $\Delta\theta_{\text{OC}}$, сердечника статора – $\Delta\theta_{\text{CC}}$ и обмотки ротора – $\Delta\theta_{\text{OP}}$ при росте α связано с уменьшением скольжения и основных потерь, что повышает эффективность охлаждения в диапазоне $0,5 < \alpha < 1,0$ за счет увеличения конвективных тепловых проводимостей элементов конструкции двигателя. Интенсивность уменьшения $\Delta\theta_{\text{OC}}$ и $\Delta\theta_{\text{CC}}$ в диапазоне $0,5 < \alpha < 1,0$ существенно выше, чем диапазоне $1,0 < \alpha < 1,5$, это справедливо для обеих схем питания двигателя. В частности $\Delta\theta_{\text{OC}}$ в "нижнем" диапазоне уменьшается на 60 °С, в "верхнем" на 15°.

Характер изменений $\Delta\theta_{\text{OP}}$ корректируется влиянием дополнительных электрических потерь $P_{\text{эл}2.v}$. Распределение превышений температур в радиальных и аксиальных сечениях представлено на рис. 4-7.

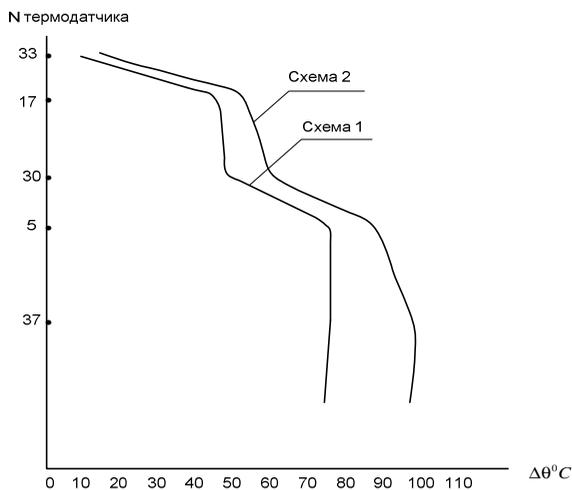


Рис. 4. Радиальное распределение $\Delta\theta^{\circ}\text{C}$, $\gamma = \alpha = 1$, $M = M_N$ [3]

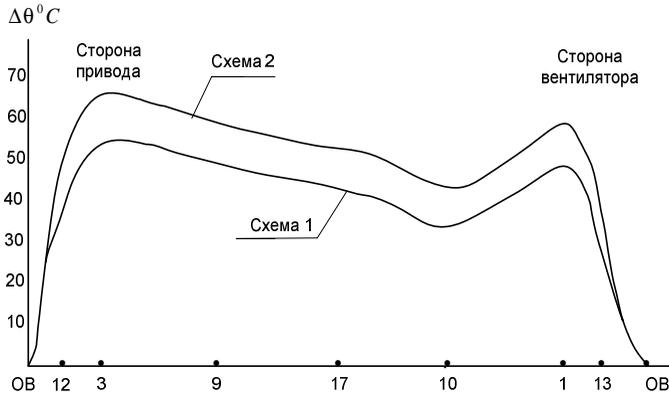


Рис. 5. Аксиальное распределение $\Delta\theta^{\circ}\text{C}$. Ветвь сердечника статора ОВ – окружающий воздух $\gamma = \alpha = 1,0 M = M_N$

Радиальное распределение включает области: ротор, зубцовая зона статора, спинка сердечника статора, оребренный обдуваемый корпус, охлаждающий воздух в межреберных каналах.

Радиальное распределение при схемах питания 1 и 2 подобны, за исключением ротора, где проявляется влияние основных потерь $P_{эл2, \nu}$ при питании по схеме 2.

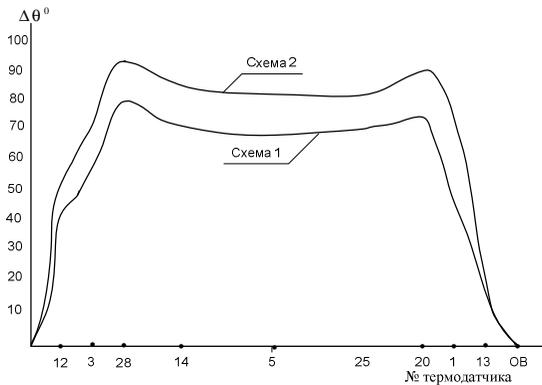


Рис. 6. Аксиальное распределение $\Delta\theta^{\circ}\text{C}$. Ветвь обмотки статора $\gamma = \alpha = 1, M = M_N$

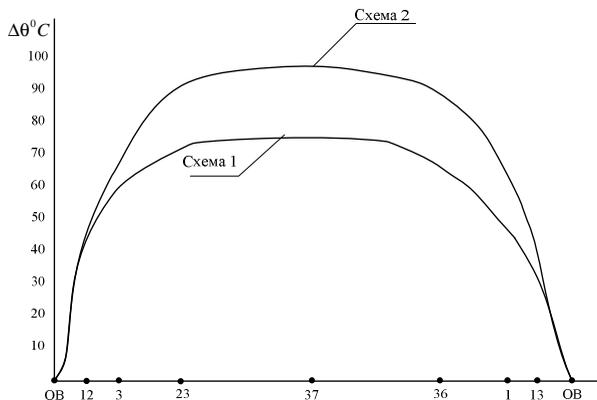


Рис. 7. Аксиальное распределение $\Delta\theta^{\circ}\text{C}$. Ветвь ротора $\gamma = \alpha = 1$, $M = M_N$

Важно отметить, что в отсутствии дополнительных потерь $\sum P_{\text{доп}v}$, превышение температуры в роторе и пазовой части обмотки статора (центр пучка проводов) практически одинаковы, первое значительное уменьшение превышений (первый скачок $\Delta\theta$) имеет место на границе зубцовой зоны, а второй скачок $\Delta\theta$ соответствует оребренному обдуваемому корпусу. В общем случае аксиальное распределение превышений температуры разделяются на три пространственные области: ветви обмотки статора, сердечника статора и ротора. Каждая из ветвей включает свои подобласти в направлении от привода к вентилятору. Ветвь обмотки статора: окружающий воздух, подшипниковый щит, окружающий воздух. Ветвь сердечника статора: между внутренним воздухом со стороны привода и вентилятора включена подобласть спинки сердечника, где размещены три термодатчика по длине. Ветвь ротора: между внутренним воздухом со стороны привода и вентилятора включена подобласть ротора, в которой по длине размещены три термодатчика. Аксиальное распределение для всех трех ветвей характеризуется различной степенью несимметрии температурного поля (так называемым "перекосом" температур) по длине двигателя. Возникновение "перекосов" обусловлено изменением теплоотдачи оребренного обдуваемого корпуса по длине двигателя для различных элементов конструкции. На начальном участке обдува условия охлаждения лучше за счет высокого коэффициента теплоотдачи, а по мере удаления от начального участка растет подогрев охлаждающего воздуха, рассеяние воздуха из межреберных каналов, снижается турбулент-

ность потока воздуха в каналах. Величина "перекосов" отдельных элементов конструкции определяется условиями теплообмена с внутренним воздухом и существенно зависит от теплопроводности материала элементов конструкции. "Перекос" температур для обмотки статора в зависимости от α и закона регулирования составляет (3-4,5)⁰С, для сердечника статора (12-16)⁰С при коэффициенте теплоотдачи для меди 390 Вт/м·град и электротехнической стали 4 Вт/м·град. Высокое значение коэффициента теплоотдачи (алюминия 155 Вт/м·град) способствует выравниванию температуры по длине обмотки ротора, что приводит к снижению "перекоса" температуры. Экспериментальные исследования подтвердили удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений аксиального распределения температурного поля для обмотки статора и ротора [5].

Выводы. 1. Экспериментально подтверждена адекватность разработанной математической модели теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах работы при синусоидальной и ступенчатой формах питающего напряжения. 2. Влияние изменения частоты вращения двигателя при различных законах регулирования на температуру отдельных элементов конструкции наиболее полно отражается с помощью тепловых характеристик зависимостей $\Delta\theta = f(\alpha)$. 3. Структура температурного поля двигателя может быть отражена с помощью распределения температур в радиальном и аксиальном сечениях двигателя. 4. При питании от автономного инвертора тепловые характеристики проходят выше при питании синусоидальным напряжением за счет роста дополнительных электрических и магнитных потерь $\sum P_{\text{допв}}$ от действия высших гармоник. Наиболее существенно влияние дополнительных потерь $\sum P_{\text{допв}}$ на тепловую характеристику обмотки ротора при $\alpha=1,0$, когда $\sum P_{\text{допв}}$ достигает максимума. 5. Распределение температур в радиальном сечении для схем 1 и 2 подобны за исключением обмотки ротора, где имеет место скачок температур за счет $\sum P_{\text{эл.2в}}$. Распределение температур в аксиальном сечении для схем 1 и 2 также подобны, при этом степень несимметрии температурного поля по длине двигателя характеризуется "перекосом" температур. 6. Величина "перекосов" температур элементов конструкции двигателя определяется причинами, действующими во внешнем контуре охлаждения, условиями теплообмена с внутренним воздухом и с другими элементами, а также

величиной коэффициента теплопроводимости материала элемента конструкции. Последнее определяет способность к выравниванию температуры вдоль длины элемента. Наименьший "перекос" отмечен для обмотки статора, наибольший – для сердечника статора.

Список литературы. 1. *Осташевский Н.А., Петренко А.Н.* . Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах // *Электронформ*. Тем. выпуск "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – 2009. – С. 266. **2.** *Борисенко А.И., Костиков О.Н., Жадан А.И.* Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с. **3.** *Петренко А.Н.* Экспериментальное исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания // *Электротехника и электромеханика*. – 2010, № 5. – С. 21-23. **4.** *Осташевский Н.А., Иваненко В.Н., Петренко А.Н.* Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования и типах преобразователей // *Электротехника и электромеханика*. – 2009, № 3. – С. 37-41. **5.** *Осташевский Н.А., Петренко А.Н.* Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки // *Электротехника и электромеханика*. – 2010, № 3. – С. 23-27. **6.** *Осташевский Н.А., Петренко А.Н.* Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования // *Вестник Национального технического университета "ХПИ"*. Сб. науч. трудов. Тем. вып. "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика". 2010. – № 16. – С. 89-102.

*Поступила в редакцию 13.10.2010
Рецензент д.т.н., проф. Милых В.И.*