

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

У статті розглянуто питання експериментального дослідження теплового стану частотно-керуемого асинхронного двигуна при різних джерелах живлення. Запропоновано для експериментального дослідження три схеми живлення. Дослідження проведені на двигуні АІР90ЛВ4, в якому закладені терморезистори СТ-1-19. Виконана оцінка впливу схеми живлення на тепловий стан двигуна.

В статті рассмотрен вопрос экспериментального исследования теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания. Предложены для экспериментального исследования три схемы питания. Исследования проведены на двигателе АИР90ЛВ4, в котором размещены терморезисторы СТ-1-19. Выполнена оценка влияния схемы питания на тепловое состояние двигателя.

### ВВЕДЕНИЕ

Погрешность в определении температур при использовании расчетных методов исследования теплового состояния электрических машин может достигать 15 %, что объясняется допущениями, присущими всем расчетным методам. Поэтому достоверная информация о тепловом состоянии электрической машины может быть получена только в результате экспериментального исследования нагрева. Это характерно и для частотно-управляемых асинхронных двигателей, у которых помимо основных потерь, связанных с первой гармоникой напряжения, возникают дополнительные электрические и магнитные потери, обусловленные высшими гармониками напряжения [1, 2]. Величина этих потерь зависит от спектра высших гармоник и их амплитуд, что, в свою очередь, определяется источником питания частотно-управляемого асинхронного двигателя. На практике используются автономные инверторы напряжения (АИН), обеспечивающие ступенчатую форму фазного напряжения на двигателе и преобразователи частоты, у которых, с целью улучшения спектрального состава выходного напряжения, применяют широтно-импульсную модуляцию прямоугольного напряжения по синусоидальному закону. Ширина импульсов изменяется в течении полупериода, наибольшая ширина импульсов наблюдается в середине полупериода, а к началу и концу ширина импульсов уменьшается [2, 3].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки степени влияния типа источника питания на тепловое состояние частотно-управляемого асинхронного двигателя, в качестве базового был выбран регулируемый источник синусоидального напряжения.

Таким образом, в ходе экспериментального исследования нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя были реализованы три режима питания. Блок-схемы источников питания, обеспечивающие каждый из режимов, представлены на рис. 1-3.

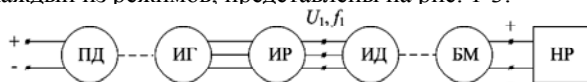


Рис. 1. Режим питания синусоидальным напряжением (схема 1)

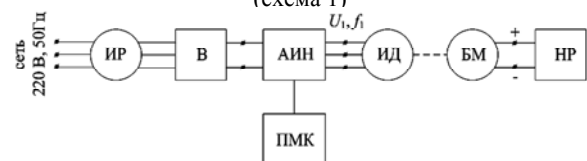


Рис. 2. Режим питания от автономного инвертора напряжения (схема 2)

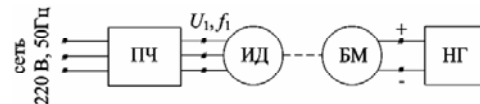


Рис. 3. Режим питания от преобразователя частоты (схема 3)

На рис. 1-3 обозначено: ПД – приводной двигатель постоянного тока; ИГ – индукторный генератор; ИР – индукторный регулятор напряжения; ИД – испытуемый асинхронный двигатель; БМ – балансирная машина постоянного тока; НР – нагрузочный реостат; В – мостовой выпрямитель; АИН – автономный инвертор напряжения; ПМК – программируемый микроконтроллер; ПЧ – преобразователь частоты (фирма "Shorh", Голландия).

Во всех режимах питания реализовывались два наиболее распространенных закона регулирования – закон регулирования при постоянном моменте  $\gamma = \alpha$ ;  $M = \text{const}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 1,0$  при регулировании "вниз" и закон регулирования при постоянной полезной мощности и неизменном напряжении  $\gamma = 1,0 = \text{const}$ ;  $P_2 = \text{const}$ ;  $1,0 \leq \alpha \leq 1,5$  при регулировании "вверх".

$$\text{Здесь } \gamma = \frac{U_{1\phi}}{U_{1\phi\text{ном}}}, \quad \alpha = \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}}.$$

В качестве исследуемого был использован асинхронный двигатель АИР90ЛВ4 с номинальными данными:  $P_{2N} = 2,5$  кВт,  $U_{1\phi N} = 220$  В,  $f_{1N} = 50$  Гц,  $n_N = 1430$  об/мин, исполнение IP44, IСО141. Потери в номинальном режиме:  $P_{эл1} = 298$  Вт;  $P_{эл2} = 129$  Вт;  $P_{\text{маг}} = 123$  Вт;  $P_{\text{мех}} = 19$  Вт;  $P_{\text{доп}} = 16$  Вт.

Для исследования температурного поля двигателя в радиальном и аксиальном сечениях, на стадии изготовления двигателя были заложены термодатчики. Схема размещения термодатчиков показана на рис. 4.

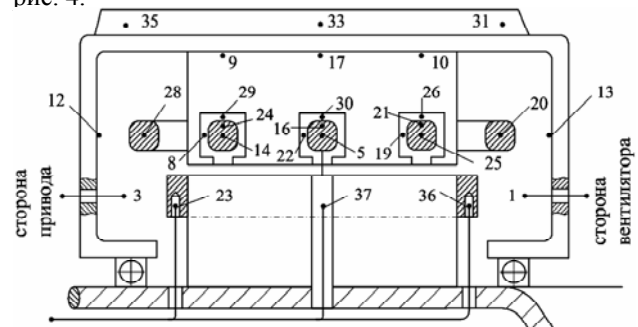


Рис. 4. Схема закладки термодатчиков

В качестве термодатчиков использовались терморезисторы СТ-1-19. В процессе исследования нагрева при трех режимах питания задавались значения

коэффициента регулирования  $\alpha$ : 1,0; 0,9; 0,7; 0,5 – при регулировании "вниз" (регулирование при постоянном моменте) и 1,0; 1,1; 1,3; 1,5 – при регулировании "вверх" (регулирование при постоянной полезной мощности).

В качестве примера в табл. 1 и 2 приведены значения превышений температур в местах размещения термодатчиков для номинального режима двигателя -  $\gamma = \alpha = 1,0$ .

Таблица 1  
Радиальное сечение ( $\gamma = \alpha$ ;  $\alpha = 1,0$ ;  $M = M_N$ )

Область двигателя	Зубцовая зона статора		Спинка сердечника		Ротор	$\Theta_{\text{обр}}$	
	Режим питания						
Номер датчика							
Режим питания	5	16	22	30	17	37	
Схема 1	72,3	59,1	61,9	49,5	44,6	75,5	29,5
Схема 2	84,7	69,2	71,3	57,0	51,4	97,2	20
Схема 3	78,8	63,9	67,2	53,7	48,2	80,0	27

Таблица 2  
Аксиальное сечение

Область двигателя	Зубцовая зона статора								
	Режим питания								
Номер датчика									
Режим питания	25	5	14	19	22	8	20	5	28
Схема 1	72,4	72,3	75,3	61,2	61,9	71,5	78,3	72,3	81,9
Схема 2	84,2	84,7	88,2	81,7	71,3	83,7	91,8	84,7	96,0
Схема 3	78,6	78,8	81,3	65,9	67,2	77,0	85,5	78,8	88,7

Продолжение таблицы 2

Ротор		Спинка сердечника						
Номер датчика								
36	37	23	26	30	29	10	17	9
69,9	75,5	73,3	42,6	49,5	53,1	36,0	44,6	49,2
89,6	97,2	94,4	49,7	57,0	62,0	42,0	51,4	57,5
73,8	80,0	77,7	46,1	53,7	57,1	38,9	48,2	52,9

Продолжение таблицы 2

Внутренний воздух	Подшипниковые щиты		Охлаждающий воздух в каналах			
Номер датчика						
1	3	13	12	31	33	35
49,2	55,0	27,7	42,1	6,7	10,0	15,5
60,1	67,2	31,4	49,8	9,4	14,1	19,4
52,6	58,5	29,8	44,9	6,8	11,6	16,0

По данным экспериментального исследования построены тепловые характеристики - зависимости превышений температур элементов конструкции дви-

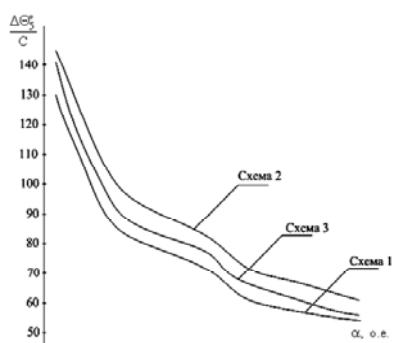


Рис. 5. Тепловая характеристика пазовой части обмотки статора  $\Delta\Theta_5 = f(\alpha)$

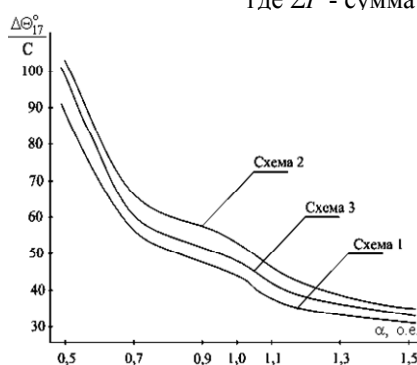


Рис. 6. Тепловая характеристика сердечника статора  $\Delta\Theta_{17} = f(\alpha)$

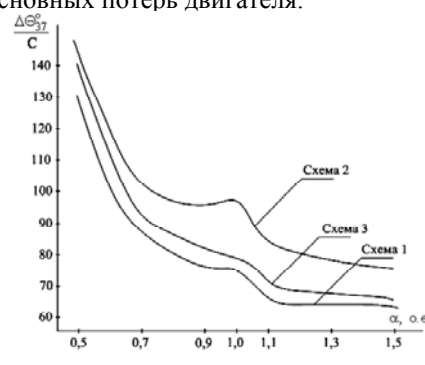


Рис. 7. Тепловая характеристика ротора  $\Delta\Theta_{37} = f(\alpha)$

Установлено, что дополнительные электрические потери в статоре и роторе  $P_{\text{эл1в}}$  и  $P_{\text{эл2в}}$  составляют 94-96 % от  $\Sigma P_{\text{допв}}$ , при этом величины  $P_{\text{эл1в}}$ ,  $P_{\text{эл2в}}$  определяются спектром и амплитудами высших гармоник тока.

По результатам экспериментальных и расчетных исследований установлено, что учету по значимости потерь подлежат 5, 7, 11, 13 гармоники тока при пи-

тания от коэффициента регулирования  $\alpha$  при трех режимах питания. Тепловые характеристики пазовой части обмотки статора, сердечника статора и обмотки ротора представлены на рис. 5-7.

Установлено, что при всех режимах питания с увеличением коэффициента регулирования  $\alpha$  превышения температур существенно уменьшаются. Наибольшие перегревы отмечены при  $\gamma = \alpha = 0,5$ ;  $M = M_N$ , так как при этом снижается максимальный момент и жесткость механической характеристики, поэтому  $M = M_N$  может быть реализован при относительном скольжении гораздо большем, чем в номинальном режиме. Так, при питании по схеме 1 и  $\gamma = \alpha = 1,0$ ;  $M = M_N$  номинальное скольжение  $s_N = 0,046$ , при той же схеме питания, но  $\gamma = \alpha = 0,5$ ;  $M = M_N$  скольжение  $s_N = 0,156$ . Увеличение скольжения приводит к росту электрических потерь в статоре и роторе: при  $\gamma = \alpha = 1,0$ ;  $P_{\text{эл1}} = 298$  Вт;  $P_{\text{эл2}} = 129$  Вт; при  $\gamma = \alpha = 0,5$ ;  $P_{\text{эл1}} = 470$  Вт;  $P_{\text{эл2}} = 195$  Вт. По мере роста  $\alpha$  при  $\gamma = \alpha$ ,  $M = M_N = \text{const}$  при всех режимах питания уменьшаются относительное скольжение и потери, а также повышается эффективность охлаждения за счет роста конвективных тепловых проводимостей элементов конструкции двигателя. При  $\alpha \geq 1,0$  происходит смена закона регулирования с  $M = M_N = \text{const}$  на  $P = P_{2N} = \text{const}$ , при этом момент двигателя, а значит и потери с ростом  $\alpha$  уменьшаются, эффективность охлаждения продолжает расти, что приводит к дальнейшему уменьшению превышений температур.

Тепловые характеристики пазовой части обмотки статора и сердечника статора при питании по схемам 2 и 3 подобны тепловым характеристикам при питании по схеме 1, но проходят выше за счет дополнительных электрических и магнитных потерь от действия высших гармоник напряжения  $\Sigma P_{\text{допв}}$ . Расчетное исследование  $\Sigma P_{\text{допв}}$  для исследуемого двигателя АИР90LB4 по методике [1] при питании по схеме 2 позволило получить зависимость  $\Sigma P_{\text{допв}} = f(\alpha)$ . В частности:

- $\alpha = 0,5$ :  $\Sigma P_{\text{допв}} = 70,6$  Вт или 9,8 % от  $\Sigma P$ ,
- $\alpha = 1,0$ :  $\Sigma P_{\text{допв}} = 120,8$  Вт или 20,3 % от  $\Sigma P$ ,
- $\alpha = 1,5$ :  $\Sigma P_{\text{допв}} = 73,1$  Вт или 13,5 % от  $\Sigma P$ ,

где  $\Sigma P$  - сумма основных потерь двигателя.

тания по схеме 2 и 5, 7 гармоники тока при питании по схеме 3. Например, для номинального режима  $\gamma = \alpha = 1,0$ ;  $M = M_N$ , действующие значения высших гармоник в % к первой гармонике тока:

- схема 2:  
 $I_5 = 34,7$  %,  $I_7 = 17,7$  %,  $I_{11} = 8,2$  %,  $I_{13} = 5,9$  %;
- схема 3:  
 $I_5 = 6,7$  %,  $I_7 = 3,2$  %.

Отсюда следует, что  $\Sigma P_{\text{доп}}$  на тепловое состояние двигателя при питании по схеме 3 существенно меньше, чем при питании по схеме 2. Потери в роторе  $P_{\text{эл2}}$  составляют в среднем 60 % от  $\Sigma P_{\text{доп}}$ . Это обстоятельство существенно влияет на вид тепловой характеристики обмотки ротора при питании по схеме 2. При  $\alpha = 1,0$ , когда  $\Sigma P_{\text{доп}}$  достигают максимума, на тепловой характеристике имеет место локальный максимум. При питании по схеме 3 тепловая характеристика обмотки ротора по форме подобна характеристике при питании по схеме 1, т.е. монотонна. Отметим также, что тепловые характеристики пазовой части обмотки статора и сердечника статора при всех схемах питания во всем диапазоне изменения  $\alpha$  монотонны, что свидетельствует о меньшем влиянии  $\Sigma P_{\text{доп}}$  на нагрев этих элементов конструкции в сравнении с ротором [4].

Показательными с точки зрения влияния схемы источника питания на тепловое состояние двигателя являются разности превышений температур при базовом режиме, т.е. питание двигателя по схеме 1 и режимам питания по схемам 2 и 3.

Для значений  $\alpha = 0,5; 1,0; 1,5$  в табл. 3 приведены разности превышений температур при питании по схемам 2 и 1, обозначенные  $\Delta\Theta_{2-1}^{\circ}$  и при питании по схемам 3 и 1, обозначенные  $\Delta\Theta_{3-1}^{\circ}$  для пазовой части обмотки статора, сердечника статора и обмотки ротора (термодатчики 5, 17, 37).

Таблица 3

$\alpha$	Термодатчик 5		Термодатчик 17		Термодатчик 37	
	$\Delta\Theta_{2-1}^{\circ}$	$\Delta\Theta_{3-1}^{\circ}$	$\Delta\Theta_{2-1}^{\circ}$	$\Delta\Theta_{3-1}^{\circ}$	$\Delta\Theta_{2-1}^{\circ}$	$\Delta\Theta_{3-1}^{\circ}$
0,5	16,2	11,4	11,6	9,2	15,8	10,4
1,0	12,4	6,5	6,8	3,6	22,4	4,5
1,5	7,0	0,9	4,1	1,3	11,8	1,5

Из данных табл. 3 следует:

- степень влияния схемы источника питания зависит от области диапазона регулирования частоты вращения и от условий закона регулирования, т.е.  $M = \text{const}$  или  $P_{2N} = \text{const}$ ;

- во всем диапазоне регулирования частоты вращения и при всех рассматриваемых законах регулирования степень влияния на тепловое состояние двигателя при схеме 2 существенно больше, чем при схеме 3.

Для рассматриваемых элементов конструкции двигателя также оценим степень влияния схемы источника питания соотношениями:

$$\Delta_{2-1}\% = \frac{\Delta\Theta_{2-1}^{\circ}}{\Delta\Theta_1^{\circ}} \cdot 100\% ; \Delta_{3-1}\% = \frac{\Delta\Theta_{3-1}^{\circ}}{\Delta\Theta_1^{\circ}} \cdot 100\% ,$$

где  $\Delta\Theta_1^{\circ}$  - превышение температуры элемента конструкции при питании по схеме 1.

Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

$\alpha$	Термодатчик 5		Термодатчик 17		Термодатчик 37	
	$\Delta_{2-1}\%$	$\Delta_{3-1}\%$	$\Delta_{2-1}\%$	$\Delta_{3-1}\%$	$\Delta_{2-1}\%$	$\Delta_{3-1}\%$
0,5	12,4	8,8	12,7	10,1	12,0	7,9
1,0	17,1	7,9	15,2	8,1	29,7	6,0
1,5	12,8	1,6	13,2	4,2	18,4	2,3

Из данных табл. 4 следует:

- наиболее существенно влияние схемы источника питания при схеме 2 и  $\alpha = 1,0$ , когда  $\Sigma P_{\text{доп}}$  достигает максимума. При этом для всех рассматриваемых элементов конструкции зависимости  $\Delta_{2-1}\% = f(\alpha)$  имеют явно выраженные максимумы в области  $\alpha = 1,0$ ;

- значения  $\Delta_{2-1}\%$  для пазовой части обмотки статора и сердечника статора составляют во всем диапазоне регулирования 12-17 %, для обмотки ротора зна-

чения  $\Delta_{2-1}\%$  значительно больше и достигают 29 %. Как отмечалось ранее, это связано с влиянием  $P_{\text{эл2}}$ ;

- при питании по схеме 3, значения  $\Delta_{3-1}\%$  во всем диапазоне регулирования значительно меньше, чем  $\Delta_{2-1}\%$ . Характерно резкое в 2,5-4 раза уменьшение  $\Delta_{3-1}\%$  в верхней части диапазона регулирования, что свидетельствует о таком же изменении  $\Sigma P_{\text{доп}}$  при питании по схеме 3. В отличие от  $\Delta_{2-1}\% = f(\alpha)$  зависимости  $\Delta_{3-1}\% = f(\alpha)$  во всем диапазоне регулирования монотонны.

## ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить влияние схемы источника питания на тепловое состояние асинхронного частотно-управляемого двигателя.

При питании от автономного инвертора напряжения и ступенчатой форме подводимого к двигателю напряжения превышения температур элементов конструкции двигателя возрастают в сравнении с режимом питания синусоидальным напряжением на 15-30 %.

При питании от преобразователя частоты и прямоугольной форме подводимого напряжения с широтно-импульсной модуляцией по синусоидальному закону – на 2-10 %.

Это обстоятельство необходимо учитывать при определении допустимой по условиям нагрева мощности двигателя во всем диапазоне регулирования частоты вращения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осташевский Н.А., [Иваненко В.Н.], Петренко А.Н. Потери в частотно-управляемом асинхронном двигателе при различных законах регулирования и типах преобразователей // Электротехника и электромеханика. – 2009. - № 3. - С. 37-41.
2. Радин В.И., Брускин А.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины. Асинхронные машины. – М.: Высшая Школа, 1988. – 324 с.
3. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 320 с.
4. Осташевский Н.А., Петренко А.Н. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки // Электротехника и электромеханика. – 2010. - № 3. - с. 23-27.

Поступила 22.09.2010

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

*A.N. Petrenko*

### Experimental investigation of a frequency-controlled induction motor heating under different power sources.

The paper considers a problem of experimental investigation of a frequency-controlled induction motor thermal condition under different power sources. Three supply circuits are chosen for the experimental investigation. The investigations are conducted with an ANV90LB4 motor in which ST-1-19 thermistors are installed. Action of every supply circuit on the motor thermal condition is estimated.

**Key words – frequency-controlled induction motor, thermal condition, supply circuit, experimental investigation.**