

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ

*У статті розглядаються питання теплового стану частотно-керуемого асинхронного двигуна в залежності від сумарних втрат, які є функцією частоти обертання і навантаження двигуна. Рішення цих питань базується на математичній моделі еквівалентної теплової схеми (ЕТС). Досліджуються додаткові втрати в осерді ротора при живленні двигуна синусоїдальною або ступінчастою формою напруги.*

*В статье рассматриваются вопросы теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в зависимости от суммарных потерь, которые зависят от частоты вращения и нагрузки. Решение этих вопросов базируется на математической модели эквивалентной тепловой схемы (ЭТС). Исследуются дополнительные потери в сердечнике ротора при питании двигателя синусоидальной или ступенчатой формой напряжения.*

### ВВЕДЕНИЕ

Тепловое состояние частотно-управляемого асинхронного двигателя зависит от величины полных потерь (основных и дополнительных от высших гармоник напряжения), определяемых величиной нагрузки, законом регулирования и величиной коэффициента регулирования  $\alpha$  и от условий охлаждения, которые при заданных исполнениях по степени защиты и способу охлаждения, также определяется коэффициентом регулирования  $\alpha$ , т.е. частотой вращения двигателя. Кроме того, влияет также и режим работы двигателя: S1, S2 и т.д. Здесь и в дальнейшем примем длительный режим работы. Таким образом, тепловое состояние, т.е. температуры отдельных частей двигателя, являются сложными функциями многих параметров.

В данной статье приводятся результаты исследования теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки в пределах  $(0,25 - 1,25) \cdot P_{2ном}$  и неизменной величине коэффициента регулирования. Приняты условия закона пропорционального регулирования т.е.  $\gamma = \alpha$  при  $\alpha = 1$ . Объектом исследования является асинхронный двигатель АИ160S4, исполнения IP44, ICO141,  $P_{2ном} = 15$  кВт,  $U_{1фном} = 380$  В,  $f_{1ном} = 50$  Гц,  $2p = 4$ , режим работы – длительный.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ

На основании разработанной математической модели теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя [1], для ЭТС, представленной на рис. 1, составлена система уравнений теплового баланса. Значения кондуктивных и конвективных тепловых сопротивлений определялись по [2]. Значения основных и дополнительных от высших гармоник напряжения потерь определялись по [3].

Целью является исследование структуры температурного поля и влияния на тепловое состояние двигателя дополнительных потерь от высших гармоник тока и магнитного потока. Для этого расчет температур узлов ЭТС проводился при ступенчатой (режим А) и синусоидальной (режим Б) формах питающего напряжения. Ступенчатая форма напряжения имеет место при питании двигателя от автономного инвертора напряжения без широтно-импульсной модуляции. В эксплуатации находится большое количество таких электроприводов.

Возникновение дополнительных магнитных потерь в сердечнике ротора  $P_{\text{маг}2\text{в}}$  приводит к изменению типа теплового сопротивления спинки сердечника ротора ("стенка без потерь" и "стенка с потерями"). В связи с этим собственные и взаимные тепловые проводимости узлов ротора (14 – обмотка ротора, 15 – вал, 16 – спинка сердечника ротора на рис. 1) образуют так называемую вариативную часть матрицы коэффициентов системы уравнений. Нумерация узлов ЭТС и их связь с элементами конструкции двигателя приводится в [1]. Поэтому в системе уравнений эти проводимости приводятся в формульном виде, а их числовые значения приводятся ниже. Температуры окружающего воздуха во внешнем контуре охлаждения  $\theta_{01}, \theta_{02}, \theta_{03}$  определялись на основе полных потерь и расхода воздуха по [2]. Мощности тепловыделения в узлах ЭТС для всех рассмотренных режимов приводятся в табл. 1.

Математическая модель [1], адаптированная к условиям поставленной задачи имеет вид:

1.  $P_1 = 65,710 \cdot \theta_1 - 11,035 \cdot \theta_2 - 8,271 \cdot \theta_{10}$ ;
2.  $P_2 = -11,035 \cdot \theta_1 + 218,056 \cdot \theta_2 - 11,035 \cdot \theta_3 - 159,23 \cdot \theta_6$ ;
3.  $P_3 = -11,035 \cdot \theta_2 + 43,17 \cdot \theta_3 - 8,271 \cdot \theta_{11}$ ;
4.  $P_4 = 215,81 \cdot \theta_4 - 172,41 \cdot \theta_5 - 37,523 \cdot \theta_7 - 5,878 \cdot \theta_{14}$ ;
5.  $P_5 = -172,41 \cdot \theta_4 + 396,42 \cdot \theta_5 - 220,94 \cdot \theta_6 - 3,062 \theta_7$ ;
6.  $P_6 = -159,23 \cdot \theta_2 - 220,94 \cdot \theta_5 + 380,18 \cdot \theta_6$ ;
7.  $P_7 = -37,523 \cdot \theta_4 - 3,062 \cdot \theta_5 + 79,368 \cdot \theta_7 - 19,391 \cdot \theta_8 - 19,391 \cdot \theta_9$ ;
8.  $P_8 = -19,391 \cdot \theta_7 + 25,252 \cdot \theta_8 - 5,861 \cdot \theta_{10}$ ;
9.  $P_9 = -19,391 \cdot \theta_7 + 25,253 \theta_9 - 5,861 \cdot \theta_{11}$ ;
10.  $P_{10} = -5,861 \cdot \theta_8 + 25,910 \cdot \theta_{10} - 8,271 \cdot \theta_1 - 3,699 \cdot \theta_{14} - 0,392 \cdot \theta_{15} - 7,686 \cdot \theta_{12}$ ;
11.  $P_{11} = -8,271 \cdot \theta_3 - 5,861 \cdot \theta_9 + 25,910 \cdot \theta_{11} - 7,686 \cdot \theta_{13} - 3,699 \cdot \theta_{14} - 0,392 \cdot \theta_{15}$ ;
12.  $P_{12} = -7,686 \cdot \theta_{10} + 12,531 \cdot \theta_{12}$ ;
13.  $P_{13} = -7,686 \cdot \theta_{11} + 10,108 \cdot \theta_{13}$ ;
14.  $P_{14} = -5,878 \cdot \theta_4 - 3,699 \cdot \theta_{10} - 3,699 \cdot \theta_{11} + \lambda_{14,14} \cdot \theta_{14} - \lambda_{14,16} \cdot \theta_{16}$ ;
15.  $P_{15} = -0,392 \cdot \theta_{10} - 0,392 \cdot \theta_{11} + \lambda_{15,15} \cdot \theta_{15} - \lambda_{15,16} \cdot \theta_{16}$ ;
16.  $P_{16} = -\lambda_{16,14} \cdot \theta_{14} - \lambda_{16,15} \cdot \theta_{15} + \lambda_{16,16} \cdot \theta_{16}$ .

Вариативная часть для режима А:  
 $\lambda_{14,14} = 75,081$ ;  $\lambda_{15,15} = 42,87$ ;  $\lambda_{16,16} = 103,892$ ;  
 $\lambda_{14,16} = \lambda_{16,14} = 61,805$ ;  $\lambda_{15,16} = \lambda_{16,15} = 42,087$ .

Вариативная часть для режима Б:  
 $\lambda_{14,14} = 34,374$ ;  $\lambda_{15,15} = 26,146$ ;  $\lambda_{16,16} = 46,458$ ;  
 $\lambda_{14,16} = \lambda_{16,14} = 21,097$ ;  $\lambda_{15,16} = \lambda_{16,15} = 25,361$ .

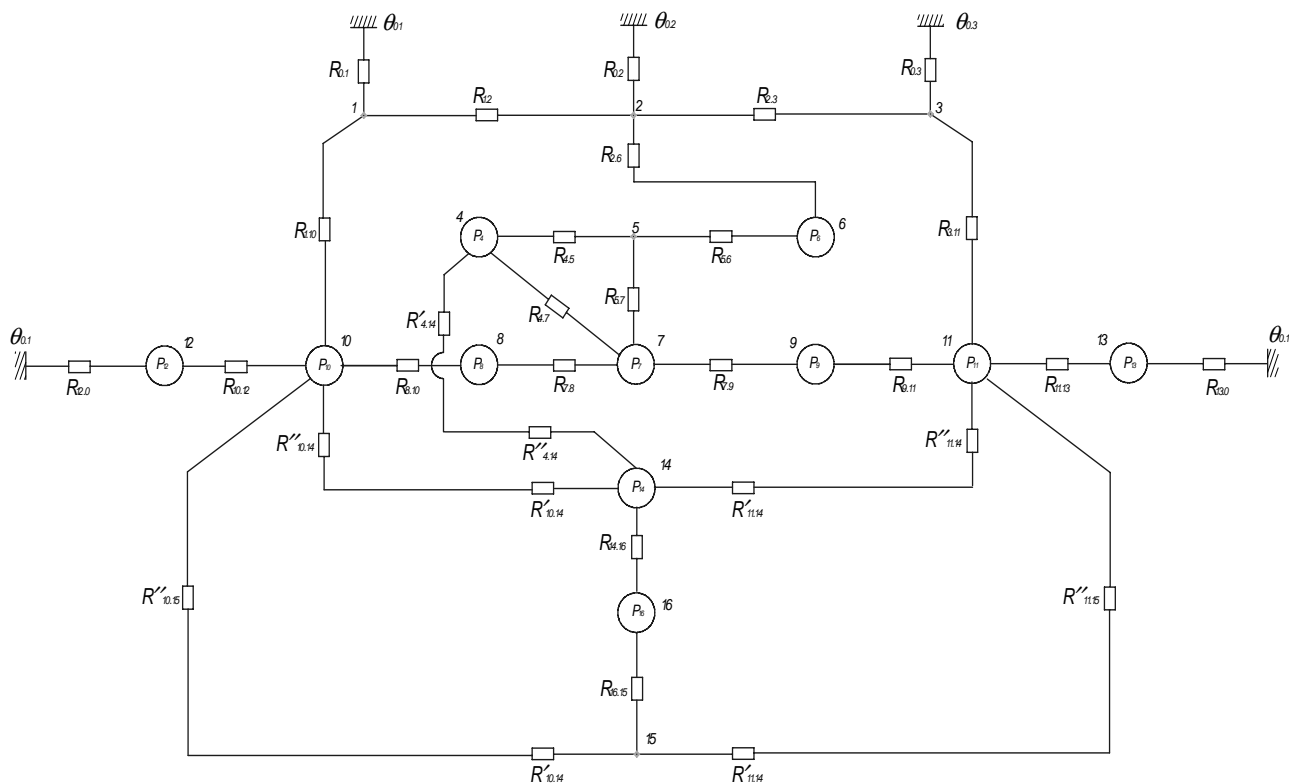


Рис. 1. ЭТС частотно-управляемого асинхронного двигателя

Таблица 1

Мощности тепловыделения в узлах ЭТС

Режим	А					Б				
	$0,25P_{2ном}$	$0,5P_{2ном}$	$0,75P_{2ном}$	$1,0P_{2ном}$	$1,25P_{2ном}$	$0,25P_{2ном}$	$0,5P_{2ном}$	$0,75P_{2ном}$	$1,0P_{2ном}$	$1,25P_{2ном}$
№ узла										
1	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160
2	971	983	1016	1105	1140	971	983	1016	1105	1140
3	679	699	745	862	910	679	699	745	862	910
4	84	91	102	118	139	82	89	100	116	137
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	200	225	267	325	400	192	217	259	317	392
7	94	124	219	406	581	53	83	178	365	540
8	70	92	164	303	434	39	62	133	272	403
9	70	92	164	303	434	39	62	133	272	403
10	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
11	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
12	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
13	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
14	247	305	446	680	775	36	94	235	469	565
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	0	0	0	0	0

Результаты расчета температур узлов ЭТС в режимах А и Б представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Режим А

$P_2$	$0,25P_{2ном}$	$0,5P_{2ном}$	$0,75P_{2ном}$	$1,0P_{2ном}$	$1,25P_{2ном}$
№ узла					
1	29,48	30,34	32,61	36,84	39,99
2	37,85	40,38	46,95	59,39	68,88
3	33,81	35,69	40,44	50,10	56,29
4	44,94	48,96	59,58	79,36	94,90
5	42,97	46,55	55,90	73,36	87,06
6	41,35	44,55	52,85	68,36	80,49
7	48,91	54,16	68,74	96,27	118,88
8	50,42	56,15	72,32	102,91	128,32
9	51,18	57,06	73,62	105,00	130,90
10	43,48	46,96	56,24	73,25	85,57
11	46,74	50,87	61,82	82,26	96,66
12	38,80	40,93	46,62	57,06	64,61
13	44,54	47,68	56,01	71,55	82,50
14	63,13	71,18	91,56	127,37	148,45
15	62,69	70,62	90,68	125,97	146,82
16	63,02	71,03	91,27	126,87	147,86

Таблица 3

Режим Б

$P_2$	$0,25P_{2ном}$	$0,5P_{2ном}$	$0,75P_{2ном}$	$1,0P_{2ном}$	$1,25P_{2ном}$
№ узла					
1	27,81	28,67	30,94	35,17	38,32
2	33,83	36,37	42,94	55,37	64,86
3	31,13	33,02	37,77	47,43	53,61
4	37,93	41,95	52,57	72,36	87,90
5	36,95	40,53	49,88	67,35	81,04
6	36,15	39,36	47,65	63,16	75,30
7	39,93	45,19	59,76	87,29	109,90
8	40,47	46,21	62,38	92,97	118,38
9	41,02	46,90	63,46	94,84	120,74
10	35,58	39,05	48,34	65,34	77,66
11	37,92	42,05	52,99	73,42	87,83
12	33,95	36,08	41,77	52,21	59,76
13	37,83	40,98	49,29	64,83	75,73
14	39,80	47,86	68,25	104,09	125,19
15	39,60	47,39	67,12	101,87	122,47
16	39,69	47,60	67,63	102,88	123,71

Таблица 4

$P_2 = 0,25P_{2ном}$	Пазовая часть обмотки статора	Основные электрические потери	52,6 Вт
		Дополнительные электрические потери от ВГН	41,2 Вт
	Лобовые части обмотки статора	Основные электрические потери	78,4 Вт
		Дополнительные электрические потери от ВГН	61,4 Вт
$P_2 = 1,0P_{2ном}$	Обмотка ротора	Основные электрические потери с учетом $P_{доп}$ от основной гармоники напряжения	35,8 Вт
		Дополнительные электрические потери от ВГН	211 Вт
	Пазовая часть обмотки статора	Основные электрические потери	365 Вт
		Дополнительные электрические потери от ВГН	41,2 Вт
	Лобовые части обмотки статора	Основные электрические потери	544 Вт
		Дополнительные электрические потери от ВГН	61,4 Вт
Обмотка ротора	Основные электрические потери с учетом $P_{доп}$ от основной гармоники напряжения	469 Вт	
	Дополнительные электрические потери от ВГН	211 Вт	

Анализ данных табл. 2 и 3 позволяет установить следующее:

1. Возникновение дополнительных потерь от высших гармоник тока и магнитного потока при режиме А изменяет величины и соотношение между мощностями тепловыделения узлов ЭТС и тепловыми проводимостями ротора по сравнению с режимом Б. Это приводит к отличию величин и соотношения температур узлов ЭТС.

2. При неизменном значении коэффициента регулирования и принятом соотношении  $\gamma = \alpha = 1$  дополнительные потери от высших гармоник магнитного потока  $P_{магв}$  и дополнительные электрические потери от высших гармоник тока в обмотках статора и ротора  $P_{эл1в}$ ,  $P_{эл2в}$  не зависят от величины нагрузки двигателя [3].

3. Дополнительные магнитные потери  $P_{магв}$  составляют 6 % от основных магнитных потерь [3] и не могут оказывать влияния на температуры сердечников двигателя. Отличие этих температур в режимах А и Б обусловлено дополнительными электрическими потерями  $P_{эл1в}$  и  $P_{эл2в}$  и изменением типа теплового сопротивления сердечника ротора в режиме А.

4. Так как дополнительные электрические потери  $P_{эл1в}$  и  $P_{эл2в}$  не зависят от величины нагрузки двигателя, то их влияние на температуры обмоток статора и ротора наиболее существенно при малых нагрузках, когда  $P_{эл1в}$  соизмеримы с основными электрическими потерями обмотки статора  $P_{эл1}$ , а  $P_{эл2в}$  значительно превосходят основные электрические потери обмотки ротора  $P_{эл2}$ . Последнее подтверждается значениями электрических потерь в пазовой и лобовых частях обмотки статора и в обмотке ротора представленными в табл. 4 для  $P_2 = 0,25P_{2ном}$  и  $P_2 = 1,0P_{2ном}$ .

Значения составляющих потерь и их соотношение между собой определяют значения температур пазовой части –  $\theta_7$ , лобовых частей –  $\theta_8$ ,  $\theta_9$  и обмотки ротора  $\theta_{14}$ . Из табл. 2 и 3 следует, что по мере увеличения мощности  $P_2$ , влияние дополнительных потерь на нагрев обмоток двигателя ослабевает. Так, при  $P_2 = 0,25P_{2ном}$  значения  $\theta_{14}$  в режимах А и Б –  $39,80^\circ$  и  $63,13^\circ$  соответственно, при  $P_2 = 1,0P_{2ном}$  –  $104,09^\circ$  и  $127,37^\circ$  соответственно. В первом случае наличие  $P_{эл2в}$  приводит к увеличению  $\theta_{14}$  в 1,6 раза, во втором – в 1,22 раза.

Аналогичные соотношения температур для сердечника статора –  $\theta_6$ : при  $P_2 = 0,25P_{2ном}$  –  $36,15^\circ$  и  $41,35^\circ$ , при  $P_2 = 1,0P_{2ном}$  –  $63,16^\circ$  и  $68,36^\circ$ . В первом случае  $\theta_6$  увеличивается в 1,14 раза, во втором – в 1,08 раза. Сердечник ротора имеет "тесную" тепловую связь с обмоткой ротора, поэтому значения температур сердечника ротора  $\theta_{16}$  в рассматриваемых режимах практически совпадает со значениями  $\theta_{14}$ , как следует из табл. 2 и 3.

Переходя к усредненным по отдельным элементам конструкции двигателя значениям увеличения температур в режиме А по сравнению с режимом Б, получим: корпус –  $3^\circ$ ; сердечник статора –  $6^\circ$ ; обмотка статора –  $10^\circ$ ; обмотка и сердечник ротора –  $23^\circ$ ; подшипниковые щиты –  $6^\circ$ . Значения увеличений температур относятся к номинальной нагрузке двигателя, но будут справедливы и для нагрузок, отличающихся от номинальной в связи с линейностью математической модели и постоянством дополнительных потерь от ВГН.

Структура температурного поля двигателя может быть отражена с помощью аксиального и радиального распределения температур вдоль узлов ЭТС. Аксиальное (от щита к щиту) распределение температур для режимов А и Б при  $P_2 = 0,25P_{2ном}$  и  $P_2 = 1,0P_{2ном}$  представлено на рис. 2 а, б. При  $P_2 = 0,25P_{2ном}$  в режиме Б распределение температур по ветви статора и ветви ротора практически совпадает и имеет слабовыраженную седлообразную форму. Здесь и в дальнейшем седлообразная форма распределения температур по ветви статора объясняется различными условиями теплоотдачи пазовой и лобовой частей обмотки статора. При той же мощности, но в режиме А, распределение температуры по ветви статора имеет седлообразную форму, а по ветви ротора – колоколообразную форму. Такая форма распределения объясняется тем, что ротор есть наиболее нагретая часть двигателя. При  $P_2 = 1,0P_{2ном}$ . Распределения температур подобны по форме в обоих режимах, отличие лишь в величинах температур.

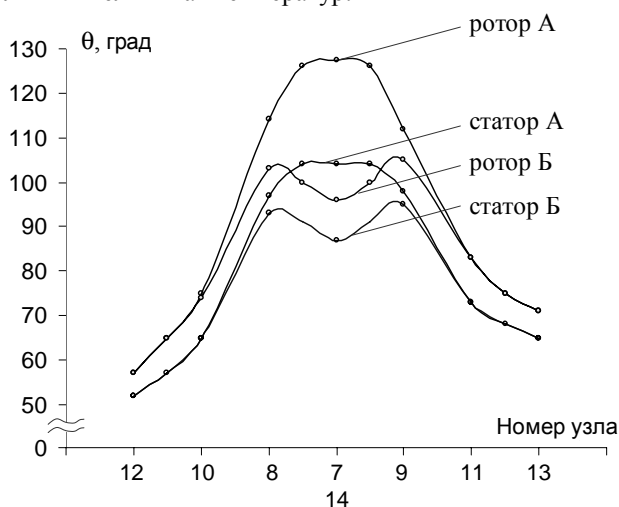


Рис. 2а. Аксиальное распределение температур вдоль узлов ЭТС (А – режим А; Б – режим Б;  $P_2 = 0,25P_{2ном}$ ;  $\gamma = \alpha = 1$ )

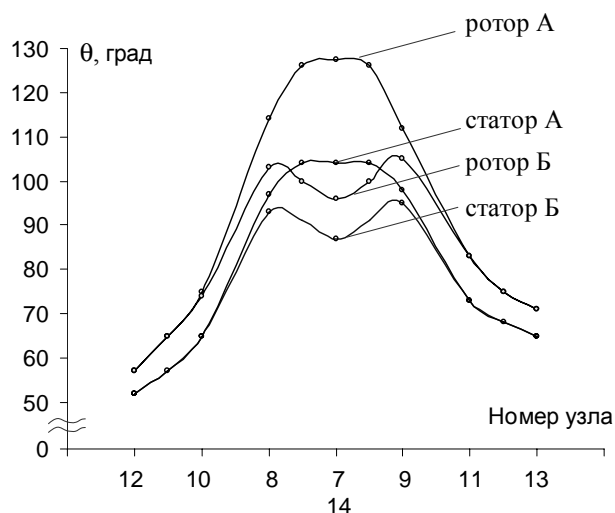


Рис. 2б. Аксиальное распределение температур вдоль узлов ЭТС (А – режим А; Б – режим Б;  $P_2 = 1,0P_{2ном}$ ;  $\gamma = \alpha = 1$ )

В табл. 5 приведены отношения максимальной и минимальной температур узлов для ветви ротора –  $\theta_{14}/\theta_{12}$ , для ветви статора –  $\theta_7/\theta_{12}$ . Эти показатели характеризуют степень неравномерности распределения температур по ветвям ротора и статора в аксиальном направлении. Степень несимметрии в том же направлении будем определять отношением температур подшипниковых щитов –  $\theta_{13}/\theta_{12}$ , внутреннего воздуха –  $\theta_{11}/\theta_{10}$  и лобовых частей обмотки статора –  $\theta_9/\theta_8$ . Ограничимся одним значением мощности  $P_2 = 1,0P_{2ном}$ , ввиду очевидного, монотонного распределения температур при  $P_2 = 0,25P_{2ном}$  (за исключением ветви ротора в режиме А).

Таблица 5

Режим	Ветвь ротора $\theta_{14}/\theta_{12}$	Ветвь статора $\theta_7/\theta_{12}$	Щиты $\theta_{13}/\theta_{12}$	Внутр. воздух $\theta_{11}/\theta_{10}$	Лобовые части обм. статора $\theta_9/\theta_8$
Режим А	2,232	1,687	1,253	1,123	1,020
Режим Б	1,993	1,671	1,241	1,123	1,020

Наиболее существенна неравномерность распределения для ветви ротора, как уже отмечалось, обмотка ротора – наиболее нагретая часть двигателя в обоих режимах питания.

Неравномерность распределения для ветви статора и степень несимметрии для щитов, внутреннего воздуха и лобовых частей обмотки статора практически не зависит от режима питания, что свидетельствует о неизменности соотношения тепловых потоков в двигателе вне зависимости от их величин. Последнее вытекает из линейности системы уравнений теплового баланса и неизменности дополнительных потерь от ВГН.

Радиальное распределение температур вдоль узлов ЭТС (от вала к окружающему воздуху в среднем сечении) для режимов А и Б при  $P_2 = 0,25P_{2ном}$  и  $P_2 = 1,0P_{2ном}$  представлено на рис. 3.

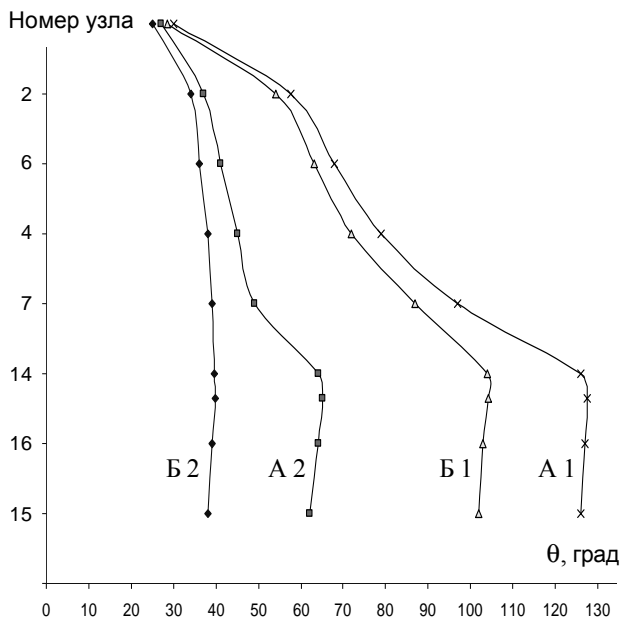


Рис. 3. Радиальное распределение температуры вдоль узлов ЭТС (А – режим А; Б – режим Б; А1, Б1 –  $P_2 = 1,0P_{2ном}$ ;  $\gamma = \alpha = 1$ ; А2, Б2 –  $P_2 = 0,25P_{2ном}$ ;  $\gamma = \alpha = 1$ )

При  $P_2 = 0,25P_{2ном}$  в режиме Б распределение равномерное монотонное, в режиме А в распределении появляется "скачек" температур для ротора, обусловленный дополнительными потерями  $P_{эл2в}$ . С учетом "тесной" тепловой связи вала 15, сердечника 16 и обмотки ротора 14, их температуры практически одинаковы независимо от величины мощности  $P_2$  и режима питания двигателя (вертикальные участки кривых рис. 3).

При увеличении нагрузки двигателя растет наклон кривых распределения за счет влияния как основных, так и дополнительных от ВГН потерь  $P_{эл1в}$  и  $P_{эл2в}$ . По мере удаления от места выделения  $P_{эл1в}$  и  $P_{эл2в}$  их влияние ослабевает, кривые распределения температур в режимах А и Б сближаются в базовом узле  $\theta_{02}$  (окружающий воздух в наружном контуре охлаждения).

## ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя позволила исследовать влияние дополнительных, обусловленных высшими гармониками тока и магнитного потока, потерь на нагрев двигателя при различной величине нагрузки, а также исследовать аксиальное и радиальное распределение температур в двигателе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Тематический выпуск научно-технического журнала "Электротриформ". – 2009. – С. 266.
2. А.И. Борисенко, О.Н. Котиков, А.И. Жадан. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
3. Н.А. Осташевский, В.Н. Иваненко, А.Н. Петренко. Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования и типах преобразователей частоты // Электротехника и электромеханика. – 2009. – № 3. – С. 37-41.

Поступила 04.01.2010

*Осташевский Николай Александрович, к.т.н., проф.*

Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, г. Харьков, ул.Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",  
кафедра "Электрические машины"

*Петренко Александр Николаевич, инженер*

АО "СКБ Укрэлектромаш"

Украина, 61050, г. Харьков, ул.Искринская, 37

*Ostashevskiy N.A., Petrenko A.N.*

### Research on thermal state of a frequency-controlled induction motor under load variation.

The paper analyzes problems of thermal state of a frequency-controlled induction motor versus total loss that depends on rotation frequency and load. Solution to these problems is based on a equivalent thermal scheme mathematical model. Additional loss in the rotor core under the motor power supply with sine or step voltage is studied.

**Key words - frequency-controlled induction motor, thermal state, load variation, total and additional loss.**