

*Н.А. ОСТАШЕВСКИЙ*, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",  
Харьков  
*А.Н. ПЕТРЕНКО*, инженер, СКБ "Укрэлектромаш", Харьков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В статті розглянуті питання дослідження теплового стану частотно-керуемого асинхронного двигуна при різних законах регулювання. Досліджується температура вузлів двигуна при ступінчатій та синусоїдальній форми напруги живлення. Виконана оцінка теплових ризиків та оптимального використання встановленої потужності.

В статье рассмотрены вопросы исследования теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования. Исследуется температура узлов двигателя при ступенчатом и синусоидальном напряжении питания. Выполнена оценка тепловых рисков и оптимального использования установленной мощности.

**Введение.** Тепловое состояние частотно-управляемого асинхронного двигателя зависит от величины греющих потерь определяемых нагрузкой машины, частоты вращения, условий охлаждения машины, определяемых исполнением по степени защиты и по способу охлаждения и от режима работы: длительный, кратковременный и т.д. Применительно к частотно-управляемому асинхронному двигателю при наиболее часто используемых исполнениях по степени защиты IP44 и по способу охлаждения IСО141, тепловое состояние зависит от величины греющих потерь (основных и дополнительных от высших гармоник напряжения – ВГН), определяемых величиной нагрузки, законом регулирования и величиной коэффициента регулирования  $\alpha$  и от условий охлаждения, также определяется коэффициентом регулирования  $\alpha$ , т.е. частотой вращения двигателя: длительный, кратковременный и т.д. Таким образом. Тепловое состояние частотно-управляемого двигателя является сложной функцией многих параметров. В данной статье приводятся результаты исследования теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования: Закон пропорционального регулирования –  $\gamma=\alpha$ ; закон квадратичного регулирования –  $\gamma=\alpha^2$ ; закон регулирования

при постоянной мощности –  $\gamma=\sqrt{\alpha}$ ; закон регулирования при постоянной мощности и неизменном значении напряжения  $U_1=U_{1ном} - \gamma$ ;  $P_2=const$ . Здесь  $\gamma=U_1/U_{1ном}$ ;  $\alpha=f_1/f_{1ном}$ . При регулировании "вниз" пределы изменения коэффициента регулирования  $0,5 \leq \alpha \leq 1,0$ , при регулировании "вверх" –  $1,0 \leq \alpha \leq 1,5$ .

Объектом исследования является асинхронный двигатель АИ160S4, исполнения IP44, IСО141,  $P_{2ном}=15$  кВт,  $U_{1фном}=380$  В,  $f_{1ном}=50$  Гц,  $2p=4$ , режим работы – длительный.

Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого двигателя приведена в [1]. На основании этой модели, 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].

**Цель работы** – исследование теплового состояния двигателя при различных законах регулирования и влияние дополнительных потерь от высших гармоник тока и магнитного потока при каждом из рассматриваемых законов регулирования.

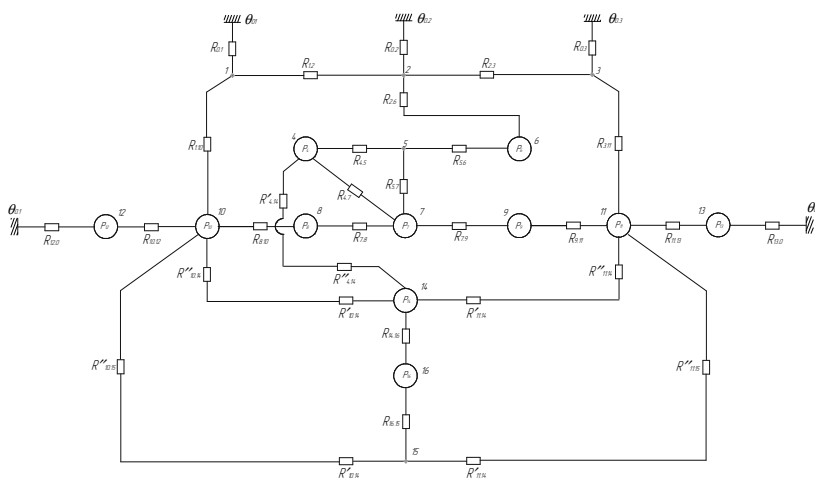


Рис. 1.

**Расчет температур** узлов ЭТС проводился при ступенчатой (режим А) и синусоидальной (режим Б) формах напряжения. В эксплуатации находится большое число таких электроприводов. Широкое изменение частоты вращения двигателя приводит к изменению конвек-

тивных тепловых сопротивлений, поэтому в системе уравнений теплового баланса они приводятся в формульном виде. Их числовые значения в виде тепловых проводимостей для всех рассматриваемых режимов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Конвективные тепловые проводимости

$\lambda$	$\alpha$						
	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
$\lambda_{01}$	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
$\lambda_{02}$	23,261	29,044	34,282	36,751	39,139	43,706	48,031
$\lambda_{03}$	15,547	19,413	22,915	24,564	26,157	29,214	32,103
$\lambda_{8,10} = \lambda_{9,11}$	4,773	5,294	5,691	5,862	6,017	6,285	6,519
$\lambda_{10,12} = \lambda_{11,13}$	5,510	6,477	7,310	7,686	8,045	8,718	9,337
$\lambda_{1,10} = \lambda_{3,11}$	6,293	7,184	7,936	8,271	8,591	9,174	9,709
$\lambda_{12,0}$	3,619	4,151	4,625	4,845	5,061	5,461	5,841
$\lambda_{13,0}$	1,810	2,075	2,313	2,422	2,53	2,731	2,921
$\lambda_{10,14} = \lambda_{11,14}$	2,518	3,039	3,493	3,699	3,882	4,264	4,604
$\lambda_{10,15} = \lambda_{11,15}$	0,262	0,32	0,370	0,393	0,414	0,453	0,489
$\lambda_{4,14}$	4,170	4,890	5,503	5,780	6,042	6,532	7,017

Кондуктивные тепловые сопротивления принимаются неизменными и в системе уравнений теплового баланса приводятся в численном виде, также в виде тепловых проводимостей. Собственные и взаимные тепловые проводимости узлов ротора (14 – обмотка ротора, 15 – вал, 16 – спинка сердечника ротора на рис. 1) изменяют свои значения в зависимости от режима питания двигателя – режимы Б или А. В последнем случае, за счет дополнительных магнитных потерь от высших гармоник магнитного потока изменяется тип теплового сопротивления спинки сердечника ротора ("стенка без потерь" и "стенка с потерями").

Числовые значения собственных и взаимных тепловых проводимостей узлов ротора приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Тепловые проводимости ротора

Режим	$\lambda_{14,14}$	$\lambda_{15,15}$	$\lambda_{16,16}$	$\lambda_{14,16} = \lambda_{16,14}$	$\lambda_{15,16} = \lambda_{16,15}$
Б	34,374	26,146	46,458	21,097	25,361
А	75,082	42,871	103,804	61,801	42,083

Температуры окружающего воздуха  $\theta_{01}$ ,  $\theta_{02}$ ,  $\theta_{03}$  определялись на основе величин греющих потерь и расхода воздуха по [2]. Мощности тепловыделения в узлах ЭТС для всех рассмотренных режимов рассчитывались по [1] и [3]. Математическая модель [1], адаптированная к условиям поставленной задачи имеет вид:

1.  $P_1 = (\lambda_{0,1} + \lambda_{1,10} + 11,035) \cdot \theta_1 - 11,035 \cdot \theta_2 - \lambda_{1,10} \cdot \theta_{10}$ ;
2.  $P_2 = -11,035 \cdot \theta_1 + (\lambda_{0,2} + 181,300) \cdot \theta_2 - 11,035 \cdot \theta_3 - 159,230 \cdot \theta_6$ ;
3.  $P_3 = -11,035 \cdot \theta_2 + (\lambda_{0,3} + \lambda_{3,11} + 11,035) \cdot \theta_3 - \lambda_{3,11} \cdot \theta_{11}$ ;
4.  $P_4 = (\lambda_{4,14} + 209,933) \cdot \theta_4 - 172,41 \cdot \theta_5 - 37,523 \cdot \theta_7 - \lambda_{4,14} \cdot \theta_{14}$ ;
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.  $P_8 = -19,391 \cdot \theta_7 + (\lambda_{8,10} + 19,391) \cdot \theta_8 - \lambda_{8,10} \cdot \theta_{10}$ ;
9.  $P_9 = -19,391 \cdot \theta_7 + (\lambda_{9,11} + 19,391) \cdot \theta_9 - \lambda_{9,11} \cdot \theta_{11}$ ;
10.  $P_{10} = -\lambda_{10,8} \cdot \theta_8 + (\lambda_{10,1} + \lambda_{10,8} + \lambda_{10,12} + \lambda_{10,14} + \lambda_{10,15}) \cdot \theta_{10} -$   
 $-\lambda_{1,10} \cdot \theta_1 - \lambda_{10,14} \cdot \theta_{14} - \lambda_{10,15} \cdot \theta_{15} - \lambda_{10,12} \cdot \theta_{12}$  ;
11.  $P_{11} = -\lambda_{11,3} \cdot \theta_3 - \lambda_{11,9} \cdot \theta_9 +$   
 $+(\lambda_{11,3} + \lambda_{11,9} + \lambda_{11,13} + \lambda_{11,14} + \lambda_{11,15}) \cdot \theta_{11} -$   
 $-\lambda_{11,13} \cdot \theta_{13} - \lambda_{11,14} \cdot \theta_{14} - \lambda_{11,15} \cdot \theta_{15}$  ;
12.  $P_{12} = -\lambda_{12,10} \cdot \theta_{10} + (\lambda_{12,10} + \lambda_{12,0}) \cdot \theta_{12}$ ;
13.  $P_{13} = -\lambda_{13,11} \cdot \theta_{11} + (\lambda_{13,11} + \lambda_{13,0}) \cdot \theta_{13}$ ;
14.  $P_{14} = -\lambda_{14,4} \cdot \theta_4 - \lambda_{14,10} \cdot \theta_{10} - \lambda_{14,11} \cdot \theta_{11} +$   
 $+(\lambda_{14,4} + \lambda_{14,10} + \lambda_{14,11} + \lambda_{14,16}) \cdot \theta_{14} - \lambda_{14,16} \cdot \theta_{16}$  ;
15.  $P_{15} = -\lambda_{15,10} \cdot \theta_{10} - \lambda_{15,11} \cdot \theta_{11} + (\lambda_{15,10} + \lambda_{15,11} + \lambda_{15,16}) \cdot \theta_{15} -$   
 $-\lambda_{15,16} \cdot \theta_{16}$ ;
16.  $P_{16} = -\lambda_{16,14} \cdot \theta_{14} - \lambda_{16,15} \cdot \theta_{15} + (\lambda_{16,14} + \lambda_{16,15}) \cdot \theta_{16}$ .

Результаты расчета температур узлов приведены в табл. 3-6.

**Особенности изменения теплового состояния двигателя.** Рассмотрим характерные особенности изменения теплового состояния двигателя при различных законах регулирования в режимах А и Б. Для этого по данным табл. 3 – 6 построены так называемые тепловые характеристики – зависимость температуры от коэффициента регулирования  $\alpha$  для: обмотки статора -  $\theta_7$  (пазовая часть), обмотка ротора -  $\theta_{14}$ , сердечника статора -  $\theta_6$ , сердечника ротора –  $\theta_{16}$ , части корпуса, прилегающей к сердечнику статора –  $\theta_2$ .

Таблица 3 – Результаты расчета температур узлов

Режим А

$\alpha$	1,0		0,9		0,7		0,5	
	$\gamma=\alpha$	$\gamma=\alpha^2$	$\gamma=\alpha$	$\gamma=\alpha^2$	$\gamma=\alpha$	$\gamma=\alpha^2$	$\gamma=\alpha$	$\gamma=\alpha^2$
1	36,84		38,38	35,69	40,99	32,80	46,08	30,28
2	59,39		63,21	55,29	67,92	45,71	77,03	37,79
3	50,10		54,03	48,31	58,99	41,54	68,66	36,02
4	79,36		83,60	71,53	88,17	55,41	97,07	42,59
5	73,36		77,48	66,61	81,95	52,43	90,85	41,11
6	68,36		72,37	62,51	76,75	49,94	85,64	39,87
7	96,27		101,17	85,67	106,53	64,27	117,14	47,72
8	102,91		108,05	91,27	114,08	67,98	125,65	49,96
9	105,00		110,37	93,15	116,27	69,03	128,37	50,67
10	73,25		76,50	66,43	80,89	52,45	89,63	41,47
11	82,26		86,70	74,72	92,18	58,01	103,41	45,04
12	57,06		58,67	52,42	60,49	43,16	64,83	35,76
13	71,55		74,49	65,39	77,65	51,77	85,07	41,14
14	127,37		135,73	113,14	148,90	83,51	172,78	60,67
15	125,97		134,27	112,00	147,41	82,84	171,27	60,32
16	126,87		135,19	112,73	148,33	83,26	172,20	60,53

Таблица 4 – Результаты расчета температур узлов

Режим А ( $P_2=\text{const}$ )

$\alpha$	1		1,1		1,3		1,5	
	$\gamma=\sqrt{\alpha}$	$\gamma=1$	$\gamma=\sqrt{\alpha}$	$\gamma=1$	$\gamma=\sqrt{\alpha}$	$\gamma=1$	$\gamma=\sqrt{\alpha}$	$\gamma=1$
1	36,84		35,37	35,74	33,27	34,51	18,46	18,17
2	59,39		55,72	56,72	50,13	53,60	44,19	48,79
3	50,10		47,95	48,78	43,56	46,35	40,01	43,77
4	79,36		73,92	75,66	66,17	72,43	58,89	67,70
5	73,36		68,50	69,98	61,46	66,76	54,62	61,99
6	68,36		63,99	65,25	57,55	62,04	51,09	57,23
7	96,27		88,85	91,66	78,59	88,54	69,21	83,53
8	102,91		94,63	97,92	83,36	94,87	72,26	88,77
9	105,00		96,64	100,00	85,13	96,91	75,20	92,28
10	73,25		68,57	70,22	62,45	68,45	51,86	59,54
11	82,26		77,05	79,01	69,69	76,75	63,56	73,51
12	57,06		54,60	55,62	51,65	55,34	46,07	50,79
13	71,55		68,07	69,56	63,55	68,92	59,99	67,58
14	127,37		116,12	119,26	100,37	112,56	86,60	103,63
15	125,97		114,86	117,94	99,30	11,26	85,65	102,33
16	126,87		115,68	118,80	100,01	112,09	86,30	103,16

Таблица 5 – Результаты расчета температур узлов

Режим Б

$\alpha$	1,0		0,9		0,7		0,5	
	$\gamma=\alpha$	$\gamma=\alpha^2$	$\gamma=\alpha$	$\gamma=\alpha^2$	$\gamma=\alpha$	$\gamma=\alpha^2$	$\gamma=\alpha$	$\gamma=\alpha^2$
1	35,17		36,24	34,17	38,59	31,77	42,84	29,71
2	55,37		57,57	51,41	62,03	43,23	69,67	36,48
3	47,43		49,50	45,03	53,87	39,45	62,01	34,83
4	72,36		74,87	65,39	79,30	51,68	86,76	40,75
5	67,35		69,71	61,22	74,07	49,12	81,53	39,45
6	63,16		65,41	57,74	69,69	46,98	77,13	38,35
7	87,29		90,51	77,98	95,64	59,63	104,68	45,43
8	92,97		96,59	82,89	102,22	62,87	112,19	47,46
9	94,84		98,54	84,50	104,07	63,79	114,49	48,09
10	65,34		67,56	59,92	71,36	48,55	78,57	39,56
11	73,42		76,17	67,01	80,91	53,42	90,20	42,75
12	52,21		53,19	48,51	54,68	40,78	58,16	34,61
13	64,83		66,49	59,53	69,11	48,29	75,14	39,42
14	104,09		109,99	94,17	120,60	72,41	139,42	55,28
15	101,87		108,90	93,29	119,49	71,88	138,29	55,00
16	102,88		109,55	93,91	120,15	72,19	138,96	55,17

Таблица 6 – Результаты расчета температур узлов

Режим Б ( $P_2=\text{const}$ )

$\alpha$	1		1,1		1,3		1,5	
	$\gamma=\sqrt{\alpha}$	$\gamma=1$	$\gamma=\sqrt{\alpha}$	$\gamma=1$	$\gamma=\sqrt{\alpha}$	$\gamma=1$	$\gamma=\sqrt{\alpha}$	$\gamma=1$
1	35,17		33,74	34,24	31,90	33,47	18,69	18,31
2	55,37		51,44	52,81	46,43	50,84	41,37	46,85
3	47,43		44,42	45,52	40,59	44,08	37,63	42,14
4	72,36		66,86	69,2	59,89	67,70	53,68	64,16
5	67,35		62,36	64,37	56,04	62,68	50,21	58,97
6	63,16		58,61	60,33	52,82	58,49	47,32	54,65
7	87,29		80,00	83,58	70,77	82,61	62,67	79,10
8	92,97		84,98	89,09	74,84	88,41	65,21	83,99
9	94,84		86,68	90,89	76,34	90,23	67,79	87,25
10	65,34		60,96	63,29	55,76	63,37	46,70	56,07
11	73,42		68,17	70,90	61,88	70,81	56,92	69,03
12	52,21		49,86	51,28	47,54	52,22	42,89	48,65
13	64,83		61,32	63,39	57,60	64,40	54,94	64,16
14	104,09		94,06	99,18	80,97	97,84	69,93	92,44
15	101,87		93,12	98,16	80,20	96,76	69,25	91,31
16	102,88		93,68	98,77	80,66	97,40	69,65	91,98

Выбор этих элементов конструкции двигателя объясняется тем, что их температуры наиболее информативны с точки зрения теплового состояния двигателя. Ввиду "тесной" тепловой связи обмотки ротора и сердечника ротора, температуры обмотки ротора  $\theta_{14}$  и сердечника ротора  $\theta_{16}$  практически равны во всех рассматриваемых режимах. Тепловые характеристики указанных элементов конструкции при различных законах регулирования в режиме А представлены на рис. 1-4.

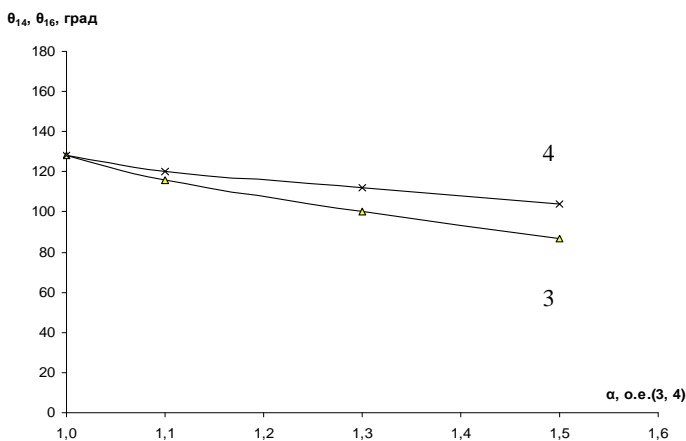
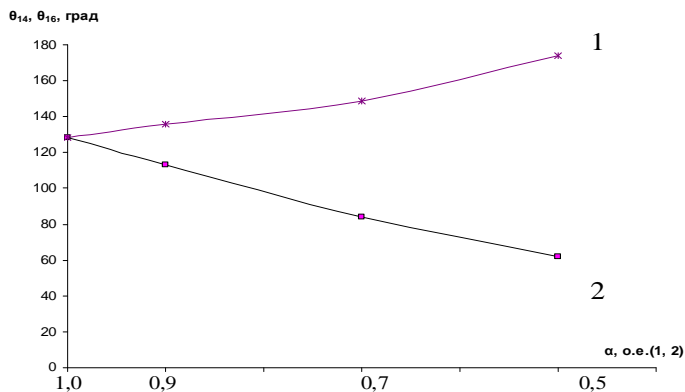


Рис. 1. Тепловые характеристики обмотки и сердечника ротора в режиме А:  
 1 – закон  $\gamma=\alpha$ ; 2 – закон  $\gamma=\alpha^2$ ; 3 – закон  $\gamma=\sqrt{\alpha}$ ; 4 – закон  $\gamma=1, P_2=\text{const}$ .

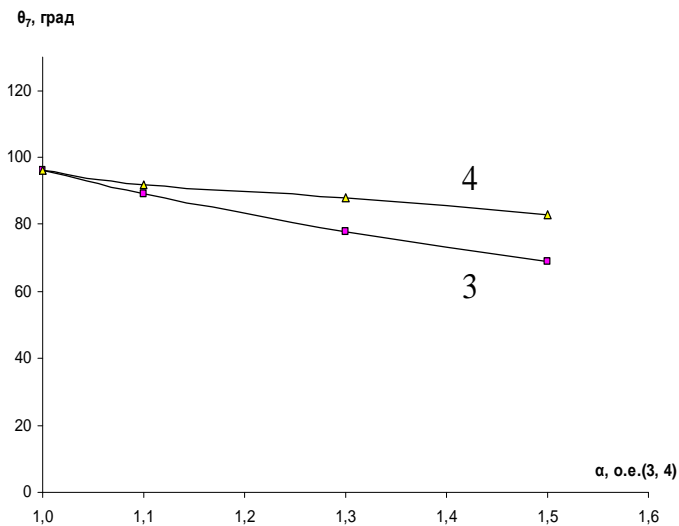
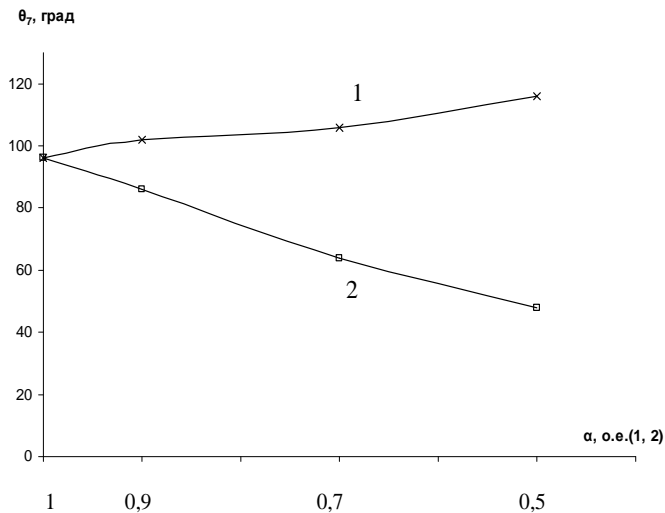


Рис. 2. Тепловые характеристики обмотки статора в режиме А:  
 1 – закон  $\gamma=\alpha$ ; 2 – закон  $\gamma=\alpha^2$ ; 3 – закон  $\gamma=\sqrt{\alpha}$ ; 4 – закон  $\gamma=1, P_2=\text{const}$ .



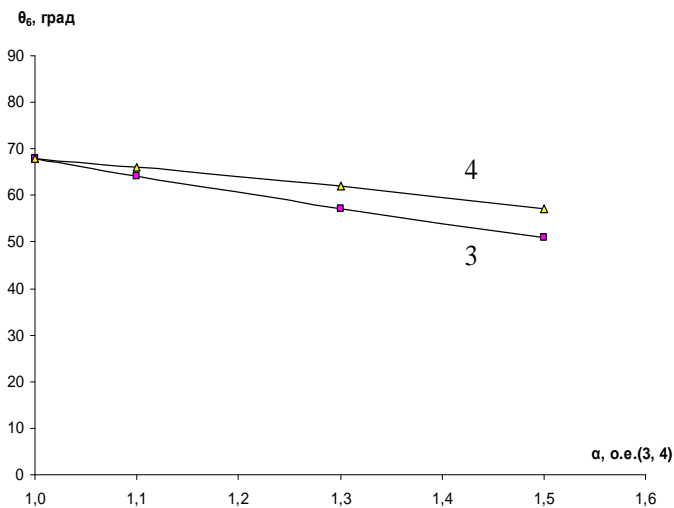
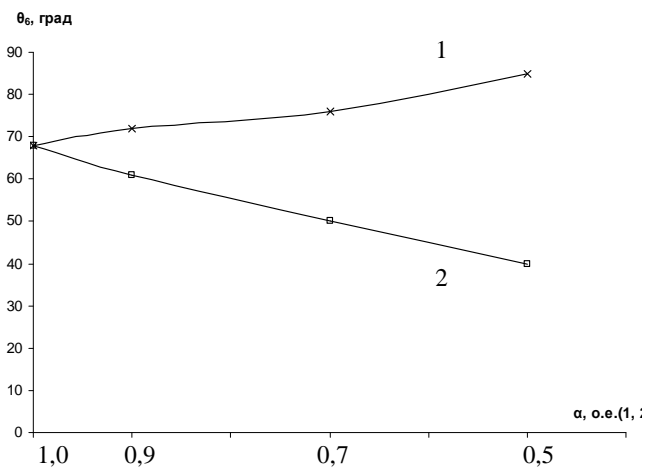


Рис. 3. Тепловые характеристики сердечника статора в режиме А: 1 – закон  $\gamma=\alpha$ ; 2 – закон  $\gamma=\alpha^2$ ; 3 – закон  $\gamma=\sqrt{\alpha}$ ; 4 – закон  $\gamma=1, P_2=\text{const}$ .

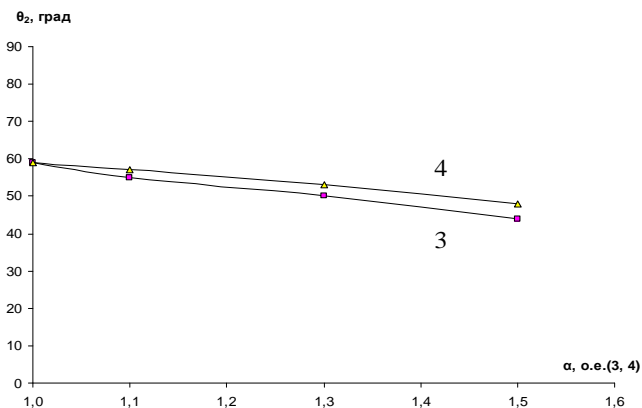
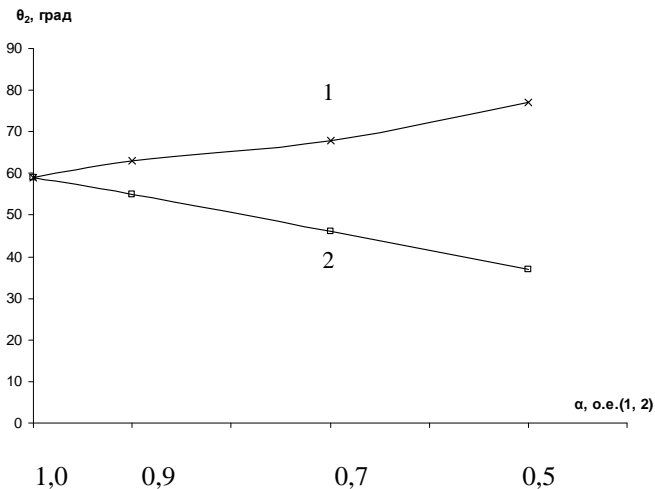


Рис. 4. Тепловые характеристики корпуса в режиме А  
 1 – закон  $\gamma=\alpha$ ; 2 – закон  $\gamma=\alpha^2$ ; 3 – закон  $\gamma=\sqrt{\alpha}$ ; 4 – закон  $\gamma=1, P_2=\text{const}$ .

Рассмотрим отдельно тепловые характеристики при регулировании "вниз" и "вверх" от номинальной частоты вращения. В качестве базового примем номинальный режим т.е.  $\gamma=\alpha=1$  и  $P_2 = P_{2\text{ном}}$ . При регулировании "вниз" ( $0,5 \leq \alpha \leq 1,0$ ) по закону  $\gamma=\alpha$  основные  $\Sigma P$  и дополнительные от ВГН потери  $\Sigma P_{\text{доп}}$  незначительно уменьшаются:  $\Sigma P$  от 1916 Вт до 1862 Вт, т.е. 1,029 раз,  $\Sigma P_{\text{доп}}$  от 331 Вт до 320 Вт, т.е. в

1,034 раз. Условия охлаждения при этом ухудшаются существенно, что следует из величин конвективных тепловых проводимостей ЭТС (табл. 2), которые, при изменении от  $\alpha=1,0$  до  $\alpha=0,5$  уменьшаются в 1,3...1,6 раз. Определяющее влияние на тепловое состояние двигателя оказывает ухудшение условий охлаждения и в результате температуры всех указанных элементов конструкции, а так же всех остальных узлов ЭТС (табл. 3) возрастает:  $\theta_7$  на 36,7%,  $\theta_{14}$  на 35,6%,  $\theta_6$  на 25,3%,  $\theta_{16}$  на 35,7%,  $\theta_2$  на 29,7% от своих значений при  $\alpha=1,0$ . Влияние дополнительных потерь от ВГН потерь на тепловое состояние двигателя при законе  $\gamma=\alpha$  оценим на основе разностей температур обмоток  $\Delta\theta$  статора и ротора в режимах А и Б (табл. 3 и 5) и значениях  $\alpha=1,0$  и  $\alpha=0,5$ :

$$\Delta\theta_7 = \theta_{7A} - \theta_{7B} \quad \Delta\theta_{14} = \theta_{14A} - \theta_{14B}.$$

Значения  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$  приведены в табл. 7.

Таблица 7 – Расчетные значения температур  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$

$\alpha$	о.е.	1,0	0,5
$\Delta\theta_7$	град	8,98°	12,46°
$\Delta\theta_{14}$	град	23,28°	33,36°

Сравнение  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$  при  $\alpha=1,0$  и  $\alpha=0,5$  позволяет сделать вывод: при уменьшении частоты вращения двигателя при регулировании по закону  $\gamma=\alpha$  влияние дополнительных потерь  $\Sigma P_{\text{доп}}$  на тепловое состояние двигателей возрастает. Отметим, что для всех рассматриваемых законов регулирования дополнительным фактором, влияющим на отличие температур узлов ротора в режимах А и Б при прочих равных условиях является изменение типа теплового сопротивления спинки ротора (см. табл. 2). При регулировании «вниз» по закону  $\gamma=\alpha^2$  потери  $\Sigma P$  и  $\Sigma P_{\text{доп}}$  существенно уменьшаются:  $\Sigma P$  от 1916 Вт до 499 Вт т.е. 3,83 раз,  $\Sigma P_{\text{доп}}$  от 331 Вт до 55 Вт, т.е. в 6,02 раза. Условия охлаждения при этом ухудшаются также как при законе  $\gamma=\alpha$ . Определяющее влияние на тепловое состояние двигателя оказывает уменьшение основных и дополнительных потерь и в результате температуры  $\theta_7$ ,  $\theta_2$ , как и остальных узлов ЭТС уменьшаются:  $\theta_7$  на 50,45%,  $\theta_{14}$  на 52,42%,  $\theta_6$  на 41,78%,  $\theta_{16}$  на 52,41%,  $\theta_2$  на 36,52% от своих значений при  $\alpha=1,0$ . Аналогично предыдущему, влияние дополнительных от ВГН потерь на тепловое состояние двигателя при законе  $\gamma=\alpha^2$  оценим на основе  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$  (табл. 3 и 5). Значения  $\Delta\theta_7$ ,  $\Delta\theta_{14}$  приведены в табл. 8.

Таблица 8 – Расчетные значения температур  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$

$\alpha$	о.е.	1,0	0,5
$\Delta\theta_7$	град	8,98°	2,27°
$\Delta\theta_{14}$	град	23,28°	5,32°

Значительное уменьшение дополнительных потерь  $\Sigma P_{\text{доп}}$  уменьшает степень их влияния и приводит к сближению температур обмоток двигателя в режимах А и Б. Таким образом, при уменьшении частоты вращения двигателя и регулировании по закону  $\gamma = \alpha^2$  влияние дополнительных потерь на тепловое состояние двигателя существенно уменьшается. При регулировании "вверх" ( $1,0 \leq \alpha \leq 1,5$ ) по закону  $\gamma = \sqrt{\alpha}$  основные  $\Sigma P$  и дополнительные  $\Sigma P_{\text{доп}}$  потери уменьшаются:  $\Sigma P$  от 1916 Вт до 1572 Вт, т.е. в 1,22 раза,  $\Sigma P_{\text{доп}}$  от 331 Вт до 276 Вт, т.е. в 1,19 раз. Условия охлаждения улучшаются, что следует из величин конвективных тепловых проводимостей в таблице 2. При увеличении  $\alpha$  от 1,0 до 1,5 их величины возрастают в 1,2...1,3 раза. Уменьшение потерь и увеличение проводимостей действуют однонаправленно и в результате температуры  $\theta_{7...}\theta_2$ , как и всех остальных узлов ЭТС уменьшаются (табл. 4):  $\theta_7$  на 28,1%,  $\theta_{14}$  на 32,0%,  $\theta_6$  на 25,3%,  $\theta_{16}$  на 31,9%,  $\theta_2$  на 25,6% от своих значений при  $\alpha=1,0$ . Влияние дополнительных от ВГН потерь  $\Sigma P_{\text{доп}}$  на тепловое состояние двигателя при законе  $\gamma = \sqrt{\alpha}$  оценим на основе  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$  (табл. 4 и 6). Значения  $\Delta\theta_7$ ,  $\Delta\theta_{14}$  приведены в табл. 9.

Таблица 9 – Расчетные значения температур  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$

$\alpha$	о.е.	1,0	1,5
$\Delta\theta_7$	град	8,98°	6,54°
$\Delta\theta_{14}$	град	23,28°	16,67°

Уменьшение дополнительных потерь  $\Sigma P_{\text{доп}}$  совместно с улучшением условий охлаждения приводят к уменьшению  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$ , т.е. снижению степени влияния  $\Sigma P_{\text{доп}}$  на тепловое состояние двигателя при увеличении частоты вращения и регулировании по закону  $\gamma = \sqrt{\alpha}$ . При регулировании "вверх" по закону  $\gamma=1$ ;  $P_2 = \text{const}$  основные потери  $\Sigma P$  увеличиваются от 1916 Вт до 2090 Вт, т.е. в 1,09 раз, дополнительные  $\Sigma P_{\text{доп}}$  потери уменьшаются так же, как при законе  $\gamma = \sqrt{\alpha}$ . Действие факторов влияющих на температуры узлов ЭТС разнонаправленные, но определяющим является влияние условий охлаждения и в результате температуры  $\theta_{7...}\theta_2$ , как и всех остальных узлов ЭТС уменьшаются:  $\theta_7$  на 13,3%,  $\theta_{14}$  на 18,6%,  $\theta_6$  на 16,6%,  $\theta_{16}$  на 18,7%,  $\theta_2$  на 18,0% от своих значений при  $\alpha=1,0$ . Влияние дополнительных от ВГН потерь  $\Sigma P_{\text{доп}}$  на тепловое состояние двигателя при законе  $\gamma=1$ ;  $P_2 = \text{const}$  оценим на основе  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$  (табл. 4 и 6). Значения  $\Delta\theta_7$ ,  $\Delta\theta_{14}$  приведены в табл. 10.

Уменьшение дополнительных потерь  $\Sigma P_{\text{доп}}$  совместно с улучшением условий охлаждения в известной мере компенсируется увеличением основных потерь  $\Sigma P$ , но в результате  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$  уменьшаются,

Таблица 10 – Расчетные значения температур  $\Delta\theta_7$  и  $\Delta\theta_{14}$ 

$\alpha$	о.е.	1,0	1,5
$\Delta\theta_7$	град	8,98°	4,43°
$\Delta\theta_{14}$	град	23,28°	11,19°

причем больше, чем при законе  $\gamma=\sqrt{\alpha}$ , т.е. температуры обмоток двигателя в режимах А и Б сближаются. Это можно трактовать как уменьшение влияния дополнительных потерь  $\Sigma P_{\text{доп}}$  при увеличении частоты вращения двигателя и регулировании по закону  $\gamma=1$ ;  $P_2=\text{const}$  по сравнению с законом  $\gamma=\sqrt{\alpha}$ .

### Выводы.

Анализ результатов исследования позволяет сделать следующие выводы:

1. Тепловое состояние частотно-управляемого асинхронного двигателя в процессе регулирования частоты вращения зависит от законов регулирования.
2. При регулировании "вниз" от номинальной частоты вращения при законе  $\gamma=\alpha$  температуры элементов конструкции двигателя ( $\theta_i$ ) возрастают, в среднем по двигателю на 29,6% при изменении коэффициента регулирования  $\alpha$  от 1,0 до 0,5. При законе  $\gamma=\alpha^2$  температуры  $\theta_i$  уменьшаются, в среднем по двигателю на 46,7% при том же диапазоне изменения  $\alpha$ .
3. При регулировании "вверх" от номинальной частоты вращения при законе  $\gamma=\sqrt{\alpha}$  температуры  $\theta_i$  уменьшаются, в среднем по двигателю на 28,6% при изменении коэффициента регулирования  $\alpha$  от 1,0 до 1,5. При законе  $\gamma=1$ ;  $P_2=\text{const}$  температуры  $\theta_i$  уменьшаются, в среднем по двигателю на 16,9% при том же диапазоне изменения  $\alpha$ .
4. Рассмотренные законы регулирования оказывают различное по степени влияния на тепловое состояние двигателя. Наибольшая степень влияния при законе  $\gamma=\alpha^2$ , наименьшая – при законе  $\gamma=1$ ;  $P_2=\text{const}$ .
5. Влияние дополнительных от ВГН потерь  $\Sigma P_{\text{доп}}$  на тепловое состояние частотно-управляемого асинхронного двигателя зависит от направления изменения основных  $\Sigma P$ , дополнительных от ВГН  $\Sigma P_{\text{доп}}$  потерь и условий охлаждения двигателя в процессе регулирования частоты вращения. Наиболее существенно это влияние при законе  $\gamma=\alpha$ , наименее – при законе  $\gamma=\alpha^2$ .
6. Проведенные исследования температурного поля частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования позволяют оценить присущие этим законам тепловые "риски" и тепловые "запасы" и тем самым обеспечить, с одной стороны надежность двигателя в эксплуатации, с другой стороны – оптимальное использование установленной мощности электропривода.

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



**Осташевский Николай Александрович**, кандидат технических наук, профессор кафедры "Электрические машины" НТУ "ХПИ". Защитил диплом инженера в 1966 году в Харьковском авиационном институте, кандидатскую диссертацию в 1972 году в Харьковском политехническом институте. Научные интересы в разработке высокоиспользуемых машин.



**Петренко Александр Николаевич**, инженер, защитил диплом с отличием в 1995 г. в НТУ "ХПИ", начальник расчетного отдела СКБ "Укрэлектромаш".

*Поступила в редколлегию 20.03.2010*