

При этом в начальный момент времени отношение амплитуд упругих моментов в ЭМС с питанием от ИН примерно в 6 раз больше, чем при питании от ИТ. Это объясняется увеличением частоты упругих колебаний валопроводов примерно в 1,5 раза.

Выводы. 1. Диаграммы скорости свидетельствуют о том, что частота электромеханических колебаний ВЭП при питании от ИТ выше, чем при питании от ИН, а их амплитуда существенно ниже. При любых других механических параметрах системы наблюдается та же тенденция. Это указывает на возможность получения более качественного согласования скоростей во взаимосвязанном через механическое оборудование многодвигательном электроприводе.

2. Приведенные в статье теоретические результаты обосновывают новую концепцию построения электроприводов согласованного вращения, позволяющую полностью исключить контуры обратных связей по скорости или положению с целью коррекции траектории движения при воздействии возмущений. Для этого указанный класс электроприводов должен получать питание от одного преобразователя с «токовой» внешней характеристикой, при этом согласование скоростей электродвигателей осуществляется за счет мощности преобразователя, подводимой к каждому двигателю, что обеспечивается благодаря автоматическому и достаточно быстрому перераспределению якорных токов.

3. Восьмилетний опыт практической эксплуатации ВЭП механизма перемещения мостового крана с питанием двигателей от преобразователя на базе параметрического ИТ, работающего в одном из прокатных цехов ОАО «Алчевский металлургический комбинат», показал: межремонтный цикл по ходовой части крана возрос почти в 2 раза. Увеличение ресурса различных узлов кинематической цепи ВЭП объясняется существенным снижением амплитуд упругих моментов, что обязательно приводит к уменьшению рывков и ударов в механических узлах привода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарцман С.Д., Жуков А.А., Каретный З.П., Филатов А.А. Снижение динамических нагрузок и повышение долговечности мостовых кранов. — Сталь, 1999, № 3.
2. Лабунцов В.А., Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Мендыбаев А.А. Токопараметрические вентильные преобразователи. — Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1980, вып.1 (120).
3. Жевержев В.Ф., Кальницкий Л.А., Сапогов Н.А. Специальный курс математики для вузов. — М.: Высшая школа, 1970.
4. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. — М.: Энергия, 1971.

[06.07.11]

Автор: Калюжный Сергей Владимирович окончил в 1997 г. факультет «Автоматизация производственных процессов» ДонГТУ (Украина, г. Алчевск). Аспирант кафедры «Автоматизированные электро-механические системы» ДонГТУ.

* * *

Анализ энергетических характеристик асинхронных электродвигателей в приводе безредукторной лифтовой лебедки¹

ЗАХАРОВ А.В., КОБЕЛЕВ А.С., КРУГЛИКОВ О.В.

Приведены основные результаты теоретического анализа основных энергетических характеристик тихоходных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, полученные при разработке специальных частотно-регулируемых электродвигателей для безредукторных лифтовых лебедок с грузоподъемностью до 1000 кг.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный двигатель, характеристики, лифтовая лебедка

Основными задачами, стоящими перед разработчиками лифтовых электродвигателей, являются: обеспечение необходимых пусковых и перегрузочных характеристик электродвигателей, низкого

Main results from a theoretical analysis of the main power performance characteristics of low-speed squirrel-cage induction electric motors obtained during the development of special adjustable-frequency electric motors for gearless lift hoists with a load capacity of up to 1000 kg are presented.

Key words: electric drive, induction motor, characteristics, lift hoist

уровня акустического шума, допустимых тепловых режимов электрической машины, уменьшение потребляемой энергии.

Указанные задачи решаются как путем совершенствования собственно конструкции лифтового электродвигателя (оптимизации электромагнитного ядра, улучшения системы охлаждения и т.п.), так и

¹ В развитие доклада авторов на конференции ЕЕССЕС—2011 [1].

за счет широкого внедрения комплектного привода — двигателей, питаемых от частотных преобразователей с использованием специальных алгоритмов управления [2].

Сопоставление энергоэффективности редукторной и безредукторной лебедок с частотно-регулируемым двигателем в реальных условиях эксплуатации требует самостоятельного рассмотрения.

Снижение уровня акустического шума в редукторной лебедке с частотно-регулируемым двигателем зависит от выбора соответствующих соотношений пазов, обеспечения высокотехнологичного производства, уменьшения уровня электромагнитных нагрузок; последнее приводит к неполному использованию активных материалов в электродвигателе.

При разработке серии лифтовых лебедок производства «РУСЭЛПРОМ» по совокупности преимуществ была выбрана структура лебедки, исключая редуктор за счет применения специальных тихоходных высокомоментных частотно-регулируемых электродвигателей.

Основные результаты разработки серии тихоходных электродвигателей лифтовых лебедок с грузоподъемностью до 1000 кг, связанные с выбором и оптимизацией геометрии активной части машин, изложены в [3]. Настоящая работа посвящена анализу энергетических характеристик разработанных электродвигателей, на основании которого и был выбран перспективный вариант конструкции магнитопровода. Кроме того, проанализировано влияние алгоритмов управления магнитным потоком на качество управления частотой вращения, потери в основных режимах, превышение температуры обмотки статора.

В табл. 1 и 2 приведены основные результаты электромагнитного расчета разработанных лифтовых электродвигателей. В табл. 1 — расчетные параметры электродвигателей привода безредукторного лифта грузоподъемностью $Q = 400, 630, 1000$ кг и кратностью полиспаста 2:1; в табл. 2 — грузо-

подъемностью 400, 630 кг и кратностью полиспаста 1:1 (прямой подвес).

В табл. 1 и 2: L — длина сердечника статора; P_2 — выходная механическая мощность; U_1 — номинальное фазное напряжение питания электродвигателя; f_1 — номинальная частота питания электродвигателя; $\cos\varphi$ — коэффициент мощности электродвигателя; I_1 — номинальное значение фазного тока электродвигателя; M_H — номинальный момент; s — номинальное скольжение; K_m — кратность максимального момента при номинальных значениях параметров; M_{Cu} — масса обмоточного провода.

Электродвигатели 5AF200...8 — специальные частотно-регулируемые электродвигатели с конструкцией активной части, обеспечивающей повышенное использование меди в пазу; 7A200...8K — специальные частотно-регулируемые с конструкцией активной части, обеспечивающей повышенное использование стали магнитопровода; электродвигатели 7A200...8M — специальные частотно-регулируемые с конструкцией активной части, обеспечивающей максимальное использование меди в пазу. В табл. 3 приведены основные соотношения, характеризующие вариант конструкции магнитопровода: D_{aS} — внешний диаметр статора; Z_S, Z_R — числа пазов статора и ротора; B_S/B_{ZS} — отношение значений индукции в воздушном зазоре и в зубце статора; $Q_{S'}/Q_R$ — отношение эффективной площади паза статора к площади паза ротора.

Анализ результатов расчета, приведенных в табл. 1–3, показал, что наименьшие значения массы обмоточной меди и длины активной части при значениях КПД, соответствующих другим вариантам, и высокой кратности максимального момента имеют электродвигатели с конструкцией активной части, обеспечивающей повышенное использование стали магнитопровода (выделенные в табл. 1–3). Этот вариант был выбран в качестве перспективного.

Таблица 1

Тип двигателя	Q , кг	L	P_2 , кВт	U_1 , В	f_1 , Гц	КПД	$\cos\varphi$	I_1 , А	МН	s	K_m	MCU
5AF200M8	400	195	2,6	202	8,9	70,3	0,83	7,3	204	8,8	1,81	15,3
7A200M8M	400	195	2,5	205	8,8	73,6	0,79	7,1	202	8,9	2,20	18,7
7A200M8K	400	195	2,5	204	8,8	71,4	0,78	7,5	201	8,1	2,18	13,2
5AF200LB8	630	225	4,1	202	9,0	68,9	0,83	11,9	322	9,9	1,73	17,0
7A200LB8M	630	225	4,1	204	9,0	71,1	0,80	11,8	325	10,9	1,97	21,2
7A200LB8K	630	225	4,1	209	9,0	70,0	0,85	11,1	324	10,6	1,90	15,1
5AF200LD8	1000	260	6,4	202	9,2	65,6	0,81	20,0	505	11,6	1,62	19,3
7A200LD8K	1000	260	6,4	204	9,2	67,9	0,81	19,0	502	11,7	1,84	17,3

Таблица 2

Тип двигателя	Q , кг	L	P_2 , кВт	U_1 , В	f_1 , Гц	КПД	$\cos\varphi$	I_1 , А	M_H	S	K_m	M_{cu}
5A200L8	400	225	2,4	194	5,1	47,1	0,87	10,0	383	21,2	1,23	17,0
7A200L8M	400	225	2,4	204	5,0	48,4	0,80	9,6	380	21,5	1,32	22,1
7A200L8K	400	225	2,4	196	5,0	50,21	0,85	9,6	381	20,1	1,38	15,3
5AF200LC8	630	260	3,5	201	5,4	44,0	0,89	14,8	557	25,9	1,16	19,3
7A200LC8M	630	260	3,7	208	5,4	47,2	0,86	14,5	603	27,7	1,28	23,9
7A200LC8K	630	260	3,8	208	5,3	46,7	0,87	14,9	600	24,5	1,29	17,1

Таблица 3

Тип двигателя	Вариант магнитопровода	D_{aS}	Z_S/Z_R	$B\delta/B_{ZS}$	Q_S/Q_R
5AF200...8	медно-стальной	327	72/68	0,41	136/152
7A200...8M	медный	327	72/86	0,40	167/121
7A200...8K	стальной	327	72/86	0,47	124/102

Следует отметить, что процессы в частотно-регулируемом электроприводе с векторным управлением при низких значениях частоты питания, т.е. рабочие процессы привода безредукторной лебедки, отличаются от полученных при моделировании. Это объясняется тем, что в структуре преобразователей с векторным управлением присутствует регулятор магнитного потока, который позволяет при любых значениях нагрузки и частоты стабилизировать поток ротора за счет изменения напряжения. Расчет такого режима с помощью классических методик [4] требует введения искусственных процедур подбора напряжения для вычисления параметров в различных режимах: пуска, торможения, номинальном, холостого хода, что увеличивает время счета и приводит к неточностям, обусловленным шумами цифровой модели и ориентацией методик на номинальный режим машины общепромышленного применения². Поэтому на этапе проектирования целесообразно проверять полученные характеристики с помощью имитационного моделирования режимов работы электропривода. При этом следует учитывать нелинейность параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя [5].

На рис. 1. приведены временные диаграммы, отражающие основные режимы работы тихоходного электродвигателя 5AF200L8 безредукторного привода лифтовой лебедки. В целях экономии времени моделирования типовой цикл сокращен за счет времени работы в номинальном режиме с девяти до двух секунд.

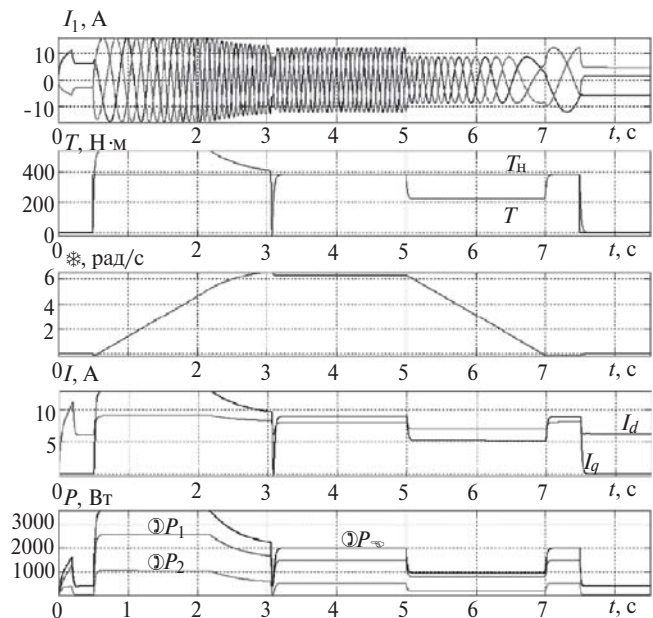


Рис. 1. Временные диаграммы основных режимов электродвигателя 5AF200L8: I_1 – фазный ток статора, А; T , T_H – моменты электродвигателя и нагрузки, Н·м; ω – угловая частота вращения, рад/с; I_d – намагничивающая составляющая тока статора; I_q – рабочая составляющая тока статора; ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_Σ – потери в обмотках статора, ротора и суммарные

Сравнение средних значений потерь энергии в основных режимах электропривода для электродвигателей 5AF200L8 и 7A200L8 приведено в табл. 4. Рассмотрены только потери в обмотках статора и ротора. Влияние магнитных потерь в сердечнике статора, а также добавочных и механических потерь при частоте питания 5,2 Гц незначительно.

Анализ потерь в типовых режимах показал, что электродвигатели с конструкцией активной части, обеспечивающей повышенное использование стали магнитопровода, по минимуму электрических потерь незначительно уступают электродвигателям с повышенным использованием меди в пазу.

² Развитие методики поверочного расчета с целью безынерционного моделирования АЭД в режиме векторного управления является самостоятельной задачей.

Таблица 4

Тип двигателя	Параметр	Режим работы				
		Разгон	Номинальный	Торможение	Удержание	Активное поле
5AF200L8	I_1	11,0	8,6	6,1	8,4	4,4
	I_2	8,1	5,9	3,4	5,7	0
	ΔP_1	2487	1541	776	1450	407
	ΔP_2	993	526	170	490	0
	ΔP	3480	2067	946	1940	407
7A200L8K	I_1	11,5	8,7	6,2	8,6	4,5
	I_2	9,1	6,5	3,8	6,4	0
	ΔP_1	2788	1628	810	1561	429
	ΔP_2	1051	539	179	512	0
	ΔP	3839	2167	989	2073	429

Для пуска электродвигателя лифтовой лебедки можно сначала провести намагничивание машины, затем растормаживание с одновременной подачей управляющего сигнала задания частоты вращения или провести растормаживание вместе с подачей управляющего сигнала задания частоты одновременно с намагничиванием машины.

Результаты моделирования режима пуска двигателя с выдержкой времени на намагничивание и без нее показали, что при отсутствии выдержки по времени на намагничивание суммарные электрические потери электродвигателя в режиме пуска увеличиваются до 4100 Вт, что составляет 7%; равномерность движения в этом случае также ухудшается, а максимальное значение тока статора возрастет на 60%.

В испытательном центре ОАО «НИПТИЭМ» установлено, что электродвигатели для лифтов грузоподъемностью 630 кг (прямой подвес) и 1000 кг (полиспасть) имеют напряженные тепловые режимы, что объясняется необходимостью работы с большими значениями магнитного потока для обеспечения высокой кратности максимального момента.

Для расчета оценки теплового состояния лифтовых электродвигателей, т.е. значения превышения температуры обмотки статора Θ_{CuS} , использован метод эквивалентных греющих потерь, который устанавливает связь между превышением температуры обмотки статора и потерями в основных элементах машины:

$$\Theta_{CuS} = \frac{p_{CuS} + K_{CuR} p_{CuR} + K_{Fe} p_{Fe}}{R_{ЭК}}$$

где p_{CuS} , p_{CuR} , p_{Fe} – потери в обмотках статора и ротора, сердечнике статора; K_{CuR} , K_{Fe} – коэффициенты влияния потерь; $R_{ЭК}$ – эквивалентное тепловое сопротивление;

$$\frac{1}{R_{ЭК}} = \frac{\Theta_{CuS}^{баз}}{p_{Гр}^{баз}},$$

где $\Theta_{CuS}^{баз}$ – превышение температуры обмотки статора базового двигателя (в базовом режиме); $p_{Гр}^{баз}$ – потери в базовом двигателе (в базовом режиме).

Базовые данные берутся из опыта; значения коэффициентов влияния потерь, полученные расчетно-теоретическим путем: $K_{CuR} = 0,7$; $K_{Fe} = 0,6$ [4]. Потери в основных элементах:

$$p_{CuS} \approx K_M^2 (p_{CuS}^{баз} - p_{CuS}^{xx});$$

$$p_{CuR} \approx K_M^2 p_{CuR}^{баз};$$

$$p_{Fe} \approx p_{Fe}^{баз},$$

где $K_M = M / M^{баз}$ – кратность момента в исследуемом и базовом режимах; p_{CuS}^{xx} – потери в обмотке статора в режиме холостого хода.

Ниже приведен оценочный расчет превышения температуры двигателя, работающего в циклическом режиме.

Период пуска. Выходные данные $M_{пуск}$, $t_{пуск}$:

$$p_{CuS}^{пуск} = \left(\frac{M_{пуск}}{M^{раб}} \right)^2 (p_{CuS}^{раб} - p_{CuS}^{xx});$$

$$p_{CuR}^{пуск} = \left(\frac{M_{пуск}}{M^{раб}} \right)^2 p_{CuR}^{раб}; \quad p_{Fe}^{пуск} = 0,5 p_{Fe};$$

$$p_{Г}^{пуск} = p_{CuS}^{пуск} + K_{CuR} p_{CuR}^{пуск} + K_{Fe} p_{Fe};$$

$$W_{\Gamma}^{\text{пуск}} = K_{\text{гс}}^2 p_{\Gamma}^{\text{пуск}} t_{\text{пуск}}$$

Период работы на постоянной частоте. Входные данные: $M_{\text{пуск}}$; $t_{\text{пуск}}$; $p_{\text{CuS}}^{\text{раб}} = p_{\text{CuS}}^{\text{раб}}$; $p_{\text{CuR}}^{\text{раб}} = p_{\text{CuR}}^{\text{раб}}$;

$$p_{\text{Fe}} = P_{\text{Fe}}:$$

$$p_{\Gamma}^{\text{раб}} = p_{\text{CuS}}^{\text{раб}} + K_{\text{CuR}} p_{\text{CuR}}^{\text{раб}} + K_{\text{Fe}} p_{\text{Fe}};$$

$$W_{\Gamma}^{\text{раб}} = K_{\text{гс}}^2 p_{\Gamma}^{\text{раб}} t_{\text{раб}}$$

Период торможения. Входные данные $M_{\text{торм}}$, $t_{\text{торм}}$:

$$p_{\text{CuS}}^{\text{торм}} = \left(\frac{M_{\text{торм}}}{M_{\text{раб}}} \right)^2 (p_{\text{CuS}}^{\text{раб}} - p_{\text{CuS}}^{\text{xx}});$$

$$p_{\text{CuR}}^{\text{торм}} = \left(\frac{M_{\text{торм}}}{M_{\text{раб}}} \right)^2 p_{\text{CuR}}^{\text{раб}}; p_{\text{Fe}}^{\text{торм}} = 0,5 p_{\text{Fe}};$$

$$p_{\Gamma}^{\text{торм}} = p_{\text{CuS}}^{\text{торм}} + K_{\text{CuR}} p_{\text{CuR}}^{\text{торм}} + K_{\text{Fe}} p_{\text{Fe}};$$

$$W_{\Gamma}^{\text{торм}} = K_{\text{гс}}^2 p_{\Gamma}^{\text{торм}} t_{\text{торм}}$$

Период стоянки (паузы). Входные данные: $t_{\text{пз}}$; $p_{\text{CuS}}^{\text{xx}} = 3 R_S I_m:$

$$p_{\Gamma}^{\text{пз}} = p_{\text{CuS}}^{\text{пз}} \text{ или } p_{\Gamma}^{\text{пз}} = 0;$$

$$W_{\Gamma}^{\text{пз}} = K_{\text{гс}}^2 p_{\Gamma}^{\text{пз}} t_{\text{пз}}$$

Если в период стоянки происходит гашение магнитного поля, то $W_{\Gamma}^{\text{пз}} = 0$.

Здесь $W_{\Gamma} = \sum_i W_{\Gamma}^i$ — энергия цикла, идущая на нагрев обмотки статора; $\langle p_{\Gamma} \rangle = W_{\Gamma} / \sum_i t_i$ — среднее значение греющей мощности, рассеиваемой за цикл; $\Theta_{\text{CuS}} = \frac{\langle p_{\Gamma} \rangle}{\langle p_{\Gamma}^{\text{баз}} \rangle} \Theta_{\text{CuS}}^{\text{баз}}$ — среднее значение пре-

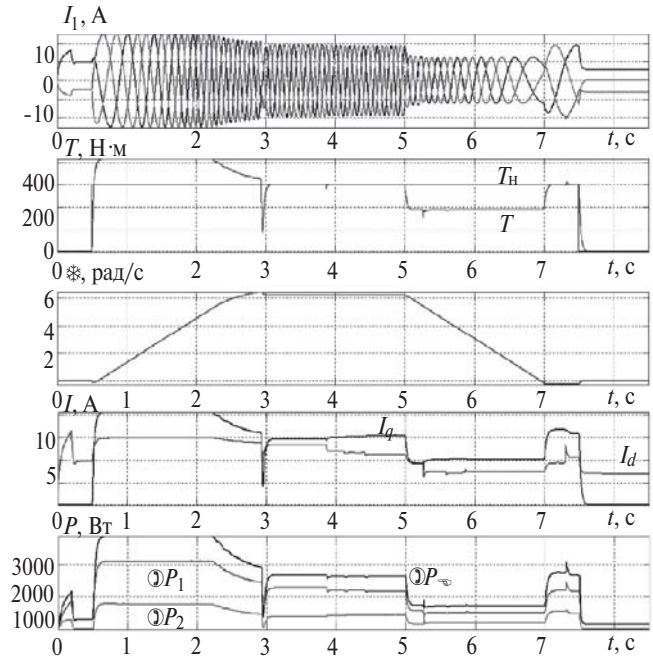


Рис. 2. Временные диаграммы основных режимов электродвигателя 7A200LC8K

вышения температуры обмотки статора; $K_{\text{гс}}$ — коэффициент гармонического состава тока, характеризующий отношение среднеквадратического значения тока к значению его первой гармоники, как правило, $1,05 \leq K_{\text{гс}} \leq 1,2$.

Верификация представленной методики с опытными данными показала удовлетворительный результат: погрешность составила 1-15%, что лежит в пределах сервис-фактора электрической машины. Несколько повышенный диапазон погрешности объясняется тем, что метод эквивалентных греющих потерь предназначен для исследования установившихся тепловых процессов, при которых его погрешность не превышает 5%.

Таблица 5

Тип двигателя	Параметр	Режим работы				
		Разгон	Номинальный	Торможение	Удержание	Активное поле
5AF200L8	I_1	17,5	14,1	10,5	13,7	7,1
	I_2	12,7	9,4	5,8	9,2	0
	ΔP_1	4055	2622	1409	2474	679
	ΔP_2	1489	821	303	769	0
	ΔP	5544	3443	1712	3248	679
7A200L8K (снижение потока)	I_1	17,5	13,4	8,9	13,2	7,1
	I_2	12,7	9,9	6,7	10,5	0
	ΔP_1	4055	2374	1053	2313	679
	ΔP_2	1489	889	407	409	0
	ΔP	5544	3263	1460	2722	679

Авторами предложен способ уменьшения потерь, а следовательно, и тепловой нагрузки машины, состоящий в уменьшении магнитного потока в номинальном режиме и торможении до значения, обеспечивающего минимум тока статора.

В табл. 5 приведены средние значения потерь энергии в основных режимах при алгоритмах без снижения и со снижением потока для электродвигателя 7A200L8K.

На рис. 2 показаны временные диаграммы, отражающие основные режимы работы тихоходного электродвигателя 7A200LC8K безредукторного привода лифтовой лебедки с использованием режима снижения потока. Использование указанного алгоритма с уменьшением потока позволяет снизить превышение температуры обмотки статора на 6%.

Вывод. По совокупности технических преимуществ тихоходный высокомоментный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором признан наиболее перспективным для использования в лифтовой лебедке. При этом электродвигатели с повышенным использованием стали магнитопровода обладает высокими энергетическими показателями с одновременной экономией дорогого обмоточного провода. На основании полученных результатов электродвигатели 7A200L8 запущены в серийное производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Захаров А.В., Кобелев А.С., Кругликов О.В.** Анализ энергетических характеристик тихоходных асинхронных электродвигателей с различными вариантами конструкции магнитопровода в приводе безредукторной лифтовой лебедки. — Сб. научных трудов IV Международ. научно-технич. конф. «Электро-механические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электро-механические системы», Екатеринбург, УРФУ, 2011.

2. **Афонин В.И., Кругликов О.В., Родионов Р.В.** Энергопотребление лифтовых электроприводов с различными системами управления. — Электротехника, 2001, № 3.

3. **Zakharov A.V., Kobelev A.S., Kruglikov O.V. et al.** Experience of calculation of low-speed high moment induction motors. — 13th Inter. Conf. on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components, Alushta, Crimea, Ukraine, 2010.

4. **Унифицированная серия асинхронных двигателей** Интерэлектро /Под ред. В.И. Радина. — М.: Энергоатомиздат, 1990.

5. **Захаров А.В.** Возможности применения прикладных программ моделирования и анализа переходных процессов в инженерных задачах проектирования асинхронного электропривода. — Электротехника, 2008, №4.

6. **Захаров А.В., Кобелев А.С., Кудряшов С.В.** Определение превышений температур и допустимых нагрузок закрытых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, эксплуатируемых в широком диапазоне частоты вращения. — Электричество, 2010, №12.

[01.06.11]

Авторы: Захаров Алексей Вадимович окончил Владимирский государственный университет по специальности «Управление и информатика в технических системах» в 2001 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка мехатронной системы с двухфазным нереверсивным индукторным двигателем» во Владимирском государственном университете в 2004 г. Ведущий специалист по математическому моделированию и расчетам, научный сотрудник ОАО «НИПТИЭМ», г. Владимир.

Кобелев Андрей Степанович окончил Кубанский аграрный университет в 1980 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Разработка численных алгоритмов и методики поверочного электромагнитного расчета трехфазных асинхронных двигателей с безотходным и малоотходным магнитопроводом» в Московском энергетическом институте в 1991 г. Начальник расчетно-теоретического сектора ОАО «НИПТИЭМ», г. Владимир.

Кругликов Олег Валерьевич окончил Московское высшее техническое училище им. Баумана в 1991 г. Управляющий директор ОАО «НИПТИЭМ», г. Владимир.

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4—5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.