ISSN 0013-5860

электротехника

5 2005

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Электротехника

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ —
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издаётся с января 1930 года

МЕДАЛЬ
"ЗА ЗАСЛУГИ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"

УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ» (г. САРАНСК)
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)
АО «ВЭлНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М., СОРИН Л.Н.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

АНОШИН О.А., БЕЛКИН Г.С., БРЯНЦЕВ А.М., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., ЕВСЕЕВ Ю.А., ИНЬКОВ Ю.М., КОЗЯРУК А.Е., КОПЫЛОВ И.П., ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У., МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А., РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора), ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б., ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕНЦЕВ С.Н.

Содержание журнала можно бесплатно получить в INTERNET через службу ИНФОМАГ, организованную в Московском физико-техническом институте. Адрес сайта: **http://www.infomag.ru**

Подписаться на журнал можно в почтовых отделениях связи по объединённому каталогу Департамента почтовой связи. Подписной индекс – 71111.
В редакции можно подписаться на журнал с любого месяца и приобрести отдельные номера за прошлые и нынешний годы.

Журнал переводится на английский язык в полном объёме и выходит в США в издательстве "ALLERTON PRESS, INC" (18 West 27th Street New York N.Y. 10001).

При перепечатке ссылка на журнал «Электротехника» обязательна.
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несёт.
Рукописи статей не возвращаются.

Издатель: ЗАО "Знак" 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: (095) **361-95-96**
E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru

Редактор отдела О.В. Кунавина.
Научный редактор Л.А. Романова.
Редактор З.П. Фёдорова

Сдано в набор 29.03.2005. Подписано в печать 25.04.2005. Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 115.
Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, стр. 5

© «Электротехника», 2005 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

№ 5 МАИ 2005

СОДЕРЖАНИЕ

40 лет ОАО "НИПТИЭМ" 2

Кравчик А.Э., Кругликов О.В., Лазарев М.В., Русаковский А.М. Перспективы разработки и производства стандартных асинхронных электродвигателей на предприятиях группы компаний "ВЭМЗ" 3

Кобелев А.С. Агентно-ориентированное программирование как реализация фреймового представления знаний об электрической машине в интеллектуальных САПР 8

Кругликов О.В., Зайцев А.М., Драгомиров М.С., Вершинин А.В., Сижанов И.С. Опыт практического применения комплекса Pro/ENGINEER в автоматизированном проектировании 14

Кобелев А.С. Эффективность использования фреймового представления знаний для организации интеллектуальных САПР электрических машин ... 18

Афонин В.И. Выбор числа пазов двигателей привода лифтов 24

Афонин В.И. Виброшумоактивность двигателей привода лифтов 28

Пискунов С.В., Ворошилов В.С., Поляков В.А. Тяговые асинхронные двигатели для приводов подвижного состава городского электротранспорта 32

Ворошилов В.С., Голембиовский М.И., Жиров В.В., Пискунов С.В. Асинхронные двигатели для оборудования АЭС 34

Андрианов М.В., Малышев Э.Е., Родионов Р.В. Экспериментальные исследования частотно-регулируемых асинхронных двигателей для атомных станций в специальных режимах работы 37

Васильченко В.А., Вершинин А.В., Зайцев А.М., Сижанов И.С. Трёхфазные асинхронные двигатели специальных конструктивных исполнений для комплектных частотно-регулируемых приводов ... 42

Виноградов А.Б., Сибирцев А.Н., Чистосердов В. Л. Новые серии преобразователей частоты и объектно-ориентированный комплектный электропривод на их основе 47

Шабаев В.А., Лазарев М.В., Захаров А.В. Алгоритмы управления вентильно-индукторным электроприводом, обеспечивающие уменьшение неравномерности электромагнитного момента 54

Виноградов А.Б. Учёт потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе 57

Шабаев В.А. Анализ источников шума вентильно-индукторного двигателя 62

Авторы опубликованных статей 65

CONTENTS

40 years J.-S.Co "NIPTIEM" 2

Kravchik A.E., Kruglikov O.V., Lazarev M.V., Rusakovskiy A.M. Prospects of stangard induction motors designing and production on VEMP group companies 3

Kobelev A.S. Agent-oriented programming as frame realization for the electrical machine intelligent cad systems 8

Kruglikov O.V., Zaycev A.M., Dragomirov M.S., Vershinin A.V., Sizhanov I.S. The experience of Pro/ENGINEER complex application for automated design of electrical machines 14

Kobelev A.S. Efficiency of frame systems knowledge representation for the electrical machine intelligent CAD systems 18

Afonin V.I. Slots number selection of motors for elevator drive 24

Afonin V.I. Vibronoiseactivity of motors for elevators driving 28

Piskunov S.V., Voroshilov V.S., Polyakov V.A. Traction asynchronous motor for rolling stock of city electric transport driving 32

Voroshilov V.S., Golembiovskiy M.I., Jirov V.V., Piskunov S.V. Asynchronous engines for the equipment of the APS 34

Andrianov M.V., Malyshev E.E., Rodionov R.V. Experimental researche of frequency-adjus-table asynchronous motors for nuclear stations in special operating modes 37

Vasilchenko V.A., Vershinin A.V., Zaycev A.M., Sizhanov I.S. Three-phase inducation motors wich special design execution for complete variable-frequency electric drive 42

Vinogradov A.B., Sibircev A.N., Chistoserdov V.L. New serieses of the converters of frequency and the object-oriented complete electric drive on their basis 47

Shabaev V.A., Lazarev M.V., Zaharov A.V. The algorithm of the switched-reluctance drive providing irregularity reducing of torque 54

Vinogradov A.B. Dynamic processes simulation of frequency-controlled induction motor with regard of iron losses, saturation and skin effect 57

Shabaev V.A. Analysis of the noise sources of the switched-reluctancemotor 62

Authors published article 65

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

40 лет ОАО "НИПТИЭМ"

Начатая ещё в довоенные годы дискуссия между специалистами о необходимости создания единых серий электрических машин закончилась в послевоенные годы созданием первой всесоюзной единой серии асинхронных двигателей А и АО. Разработка и внедрение всесоюзных единых серий (особенно серии А2) выявили необходимость создания комплексного института, способного проводить глубокие исследования параметров электрических машин, вести проектирование с одновременной технологической проработкой, разрабатывать и заказывать технологическую оснастку и оборудование, изготавливать, испытывать и осуществлять "доводку" макетных и опытных образцов новых электрических машин, принимать непосредственное участие во внедрении новых серий электродвигателей на заводах страны. В этой связи Государственным Комитетом по электротехнике при Совете Министров СССР в сентябре 1964 г. был издан приказ "Об организации Владимирского филиала "Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики" (ВФ "ВНИИЭМ"). В марте 1965 г. приступил к исполнению своих обязанностей первый директор института – кандидат технических наук Виктор Михайлович Петров. 21 июня 1969 г. ВФ "ВНИИЭМ" был преобразован в Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения (НИПТИЭМ). В 1979 г. НИПТИЭМ стал Всесоюзным (ВНИПТИЭМ). В начале 80-х годов ВНИПТИЭМ получил признание ведущего института страны по исследованию, созданию, внедрению, организации производства и применения всесоюзных единых серий низковольтных асинхронных двигателей. Основными направлениями деятельности института были:

– научные исследования прикладного характера;

– опытно-конструкторские разработки по созданию новых серий асинхронных двигателей и других электрических машин (например, вентильных);

– разработка новых специфических технологических процессов, оснастки, оборудования;

– работы общеотраслевого характера в области производства, экономики и планирования.

Институт располагает опытным производством, а также специализированными лабораториями для исследования электромагнитных, тепловентиляционных, виброакустических, механических, климатических и других параметров электрических машин, аппаратов и электроприводов.

Специалистами института были исследованы электротехнические стали, изоляционные материалы, а также электромагнитные поля, тепловентиляционные процессы, виброакустические, надежностные и другие параметры низковольтных электрических машин. Результаты проведенных исследований были использованы конструкторами института и другими специалистами при разработке, внедрении, производстве и применении единых всесоюзных и международных серий асинхронных двигателей и других электрических машин.

После распада СССР в связи с приватизацией в 1993 г. институт стал Открытым акционерным обществом "Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения" (ОАО "НИПТИЭМ") и впоследствии (2002 г.) вошёл в Российский электротехнический концерн "Русэлпром".

В этом номере журнала помещены статьи, содержащие результаты научно-исследовательских и конструкторских работ, выполненных специалистами ОАО "НИПТИЭМ" в последнее время.

Я.Б. Тубис, главный научный сотрудник ОАО "НИПТИЭМ",
член редколлегии журнала "Электротехника"

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Перспективы разработки и производства стандартных асинхронных электродвигателей на предприятиях группы компаний "ВЭМЗ"

КРАВЧИК А.Э., КРУГЛИКОВ О.В., ЛАЗАРЕВ М.В., РУСАКОВСКИЙ А.М.

Приведены основные направления совершенствования низковольтных трёхфазных асинхронных двигателей общепромышленного применения. Рассмотрены вопросы организации производства, совершенствования технологии изготовления узлов и деталей двигателей новой серии.

There were indicated main directions of low-voltage three-phase induction basic version motors perfection. There were mentioned requirements on motors of now series with high technical level and quality. There were considered questions about production organization, perfection of technology concerned with production of nodes and components for new series motors.

Стандартные низковольтные асинхронные двигатели являются основой электропривода в промышленности и сельском хозяйстве. Вместе с тем они – один из основных потребителей электроэнергии. Оба эти обстоятельства побуждают к непрерывному совершенствованию этих машин.

Основными направлениями совершенствования стандартных асинхронных двигателей являются:

– повышение энергоэффективности;

– снижение уровня шума;

– универсализация;

– повышение надёжности и долговечности;

– улучшение внешнего вида (совершенствование дизайна);

– повышение удобства монтажа и эксплуатации.

Энергоэффективность асинхронных электродвигателей характеризуется уровнем КПД и коэффициентом мощности (cos φ).

В Европейском сообществе (ЕС) и Российской Федерации практически одновременно в 2000 г. были приняты нормы на КПД асинхронных двигателей.

Евронормы СЕМЕР для двух- и четырёхполюсных двигателей мощностью от 1,1 до 90 кВт предусматривают три уровня КПД:

– нормальный – EFF3;

– повышенный – EFF2;

– высокий – EFF1.

Нормы EFF2 и EFF1 приведены в табл.1. К уровню EFF3 относят значения КПД ниже уровня EFF2.

Нормы на КПД в РФ в соответствии с ГОСТ 51677-2000 предусматривают два уровня КПД:

– нормальный, практически совпадающий с уровнем EFF2 Евронорм СЕМЕР;

– повышенный, практически совпадающий с уровнем EFF1 Евронорм.

При этом нормы ГОСТ 51677-2000 охватывают двигатели всех полюсностей в диапазоне мощности от 1,1 до 400 кВт.

Уровень шума асинхронных двигателей характеризуется значениями звуковой мощности L_w или звукового давления L_p.

Уровень шума асинхронных двигателей регламентируется нормами МЭК IEC 60034-9 (редакция 10-2003 г.). Однако нормы МЭК намного превышают достигнутый в практике уровень и не соответствуют современным требованиям потребителей.

Анализ технических данных ведущих европейских фирм, а также перспективных требований рынка позволил сформулировать требования к уровню шума асинхронных двигателей. В табл.2 приведены значения уровня звукового давления (L_p, дБ(А)) двух- и четырёхполюсных асинхронных двигателей мощностью от 1,1 до 315 кВт в зависимости от габарита – высоты оси вращения (H), на которые, по нашему мнению, следует ориентироваться как на перспективные.

Таблица 1

P, кВт		1,1	1,5	2,2	3	4	5,5	7,5	11	15
КПД,%	EFF2	76,2	78,5	81	82,6	84,2	85,7	87	88,4	89,4
	EFF1	82,8	84,1	85,6	86,7	87,6	88,6	89,5	90,5	91,3
P, кВт		18,5	22	30	37	45	65	75	90	
КПД,%	EFF2	90	90,5	91,4	92	92,5	93	93,6	93,9	
	EFF1	91,8	92,2	92,9	93,3	93,7	94	94,6	95	

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 2

H, мм		90	100	112	132	160	180	200	225	250	280	315	350
L_p, дБ(А)	$2p = 2$	61	62	63	67	70	71	72	73	75	77	80	82
	$2p = 4$	50	53	54	58	63	64	65	66	67	68	70	75

Универсализация стандартных асинхронных двигателей достигается:

– высокой степенью защиты – не ниже IP55 по IEC 60034-5, что позволяет использовать их в средах с высоким содержанием пыли и влаги, а также на открытом воздухе;

– пусковыми характеристиками, соответствующими требованиям МЭК IEC 60034-12;

– обеспечением длительной работы при колебаниях напряжения сети до ± 10 $U_н$;

– наличием сервис-фактора, что позволяет использовать двигатель при температуре окружающей среды до 50°С без снижения мощности и в ряде случаев избежать переустановленной мощности.

Достаточная ***надёжность и долговечность*** обмотки обеспечивается температурными запасами – применением изоляции класса нагревостойкости F при фактических температурах соответствующих изоляции класса B, что повышает расчётный ресурс статорных обмоток как минимум вдвое. Долговечность подшипников обеспечивается правильным их выбором в сочетании с высоким качеством обработки посадочных мест и качественной сборкой.

Хороший ***внешний вид и удобство монтажа и эксплуатации*** достигаются функциональным дизайном и обеспечиваются соответствующей технологией изготовления элементов оболочки и технологией отделки.

В настоящее время Владимирский электромоторный завод выпускает двигатели серии 5А, разработанной в середине 90-х годов на базе серии АИ. Ранее завод выпускал двигатели серии АИ только двух габаритов – АИР 132 и АИР 180. После распада СССР завод был поставлен перед необходимостью производства всего ряда стандартных асинхронных двигателей от 1,1 до 200 кВт. Поэтому серия 5А – серия переходного периода и является компромиссом между требованием внутреннего рынка и возможностями конкретного предприятия. По всем техническим параметрам двигатели серии 5А соответствуют рекомендациям МЭК IEC 60034. Привязка рядов мощности и установочных размеров соответствует принятой ранее (в 1971 г.) странами-членами СЭВ и регламентируется ГОСТ Р 51689-2000. За рубежом, практически во всех странах за исключением США, принята иная привязка рядов мощности и установочных размеров, соответствующая нормам CENELEK, действующими в ЕС.

Впоследствии, для обеспечения экспорта, в серии 5А была предусмотрена модификация с привязкой по Евронормам, унифицированная с базовыми машинами по активным частям и ряду элементов конструкции.

По энергетическим характеристикам (уровню КПД) двигатели серии 5А соответствуют требованиям ГОСТ 51677-2000 для нормального КПД и уровню EFF2 Евронорм СЕМЕР. Уровень шума двух- и четырёхполюсных двигателей серии 5А превышает шумы соответствующих машин ведущих фирм Европы (ABB, "Siemens").

Пусковые характеристики двигателей 5А соответствуют рекомендациям МЭК и, в основном, требованиям внутреннего и внешнего рынка.

Двигатели серии 5А допускают длительную эксплуатацию при колебаниях напряжения ± 5%.

Двигатели серии 5А80-160 имеют сервис-фактор 1,15 и при изоляции класса нагревостойкости F имеют температуру обмоток не выше допустимой для класса нагревостойкости B, т.е. имеют температурный запас 20°С . Температурный запас для двигателей старших габаритов около 10°С.

По функциональности дизайна и внешнему виду двигатели серии 5А уступают лучшим зарубежным аналогам.

Становление отечественного машиностроения, растущие требования внутреннего рынка, а также предстоящее вступление РФ в ВТО и связанная с этим неизбежная конкуренция с мировыми производителями диктуют необходимость создания новой серии стандартных асинхронных двигателей высокого технического уровня и качества. Двигатели этой серии должны соответствовать требованиям МЭК (IEC 60034) и удовлетворять ряду следующих дополнительных условий и требований:

1. Привязка рядов мощности и установочных размеров должна соответствовать Евронормам CENELEK, принятым в большинстве стран

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 3

Габарит H, мм	Установочный размер	Мощность P_2, кВт, Число полюсов: 2	4	6	8
90	*S*	1,5	1,1	0,75	0,37
	L	2,2	1,5	1,1	0,55
100	*L*	3,0	2,2; 3,0	1,5	0,75; 1,1
112	*M*	4,0	4,0	2,2	1,5
132	*S*	5,5	–	3,0	–
	M	7,5	5,5; 7,5	4,0; 5,5	2,2; 3,0
160	*M*	11	11	7,5	4
	L	15; 18,5	15	11	5,5; 7,5
180	*M*	22	18,5	–	–
	L	–	22	15	11
200	*L*	30 ; 37	30	18,5; 22	15
225	*S*	–	37	–	18,5
	M	45	45	30	22
250	*M*	55	55	37	30
280	*S*	75	75	45	37
	M	90	90	55	45
315	*S*	110	110	75	55
	L	132	132	90	75
	M	160; 200	160; 200	110; 132	80; 110
350	*S*	250	–	160	132
	M	315	250; 315	200	160
	L	–	–	250	200

(табл.3). Это расширит экспортные возможности отечественных предприятий, позволит гармонизировать стандарты РФ и ЕС, что необходимо для функционирования в рамках ВТО, а также снимет целый ряд проблем в производстве, связанных с выпуском двигателей по различным стандартам.

2. Новая серия должна базироваться на ряде внешних диаметров сердечников статора, отличных от принятых для серий АИ и 5А и оптимальных для новой привязки рядов мощности и установочных размеров. Эти диаметры сердечников должны обеспечить полное круговое оребрение станины и позволить избежать «поджатия», уменьшающего поверхность оребрения корпусов и ухудшающего охлаждение двигателей.

3. КПД двигателей новой серии должен соответствовать уровню EFF2 Евронорм СЕМЕР и ГОСТ 51677-200. В конструкции двигателей должна быть предусмотрена возможность изготовления двигателей с КПД, соответствующим уровню EFF1 норм СЕМЕР и ГОСТ 51677-2000 для повышенного КПД.

4. Двигатели новой серии должны быть спроектированы с температурным запасом не менее, чем 20°С, т.е. иметь превышение температуры обмоток, соответствующее классу нагревостойкости В при применении изоляции класса нагревостойкости F. Это позволит иметь сервис-фактор не менее 1,15, обеспечит возможность длительной эксплуатации при колебаниях напряжения до ±10% и существенно повысит ресурс машин.

5. Уровень шума двигателей новой серии должен быть существенно снижен. Шум двух- и четырёхполюсных двигателей не должен превышать значений, указанных в табл.2. Это может быть достигнуто оптимизацией вентиляционных и подшипниковых узлов двигателей. Снижение шума шести- и восьмиполюсных двигателей может быть достигнуто за счёт: уменьшения неравномерности воздушного зазора, качественной сборки сердечников и двигателей в целом, а также оптимизации подшипниковых узлов.

6. Двигатели новой серии должны иметь хороший внешний вид и быть удобными для монтажа и обслуживания при эксплуатации. Это должно обеспечиваться рациональным и функциональным дизайном в сочетании с прогрессивными технологиями получения элементов оболочки и внешней отделки.

В современной рыночной экономике рассматривать основные направления совершенствования стандартных асинхронных двигателей необходимо с учётом тенденций развития производств и технологий. Организация, которая хочет преуспеть в новой внешней среде должна работать над постоянными улучшениями, касающимися как технологий, качества продуктов и услуг, так и качества менеджмента.

Усиливающаяся конкуренция и постоянное повышение цен на сырьё заставляют предприятия, производящие стандартные низковольтные асинхронные двигатели, искать всё новые способы сокращения расходов. Одним из наиболее эффективных путей повышения конкурентоспособности является создание сети субподрядчиков.

Своими силами европейские передовые производители осуществляют только уникальные операции, на которые есть патенты или know-how, если требуется – обработку и окончательную сборку продукции. Все остальные компоненты и производственные операции они заказывают у субпоставщиков.

Сложилась многоуровневая система, наверху которой находятся крупные машиностроительные концерны и производители готовой промышленной продукции. Следующий уровень – это поставщики готовых узлов или частей продукции. Промежуточных

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

уровней может быть несколько, и, обычно, на нижнем находится небольшой узкоспециализированный цех, который выполняет лишь небольшое число операций. Таким образом, субконтрактинг обеспечивает работой большое количество производственных предприятий.

Требования, предъявляемые крупными западными концернами к своим поставщикам, являются недостижимыми для большинства российских производителей по трём основным критериям: цена, сроки поставки и качество. Низкая производительность труда сводит на нет то конкурентное преимущество, которое получают российские производства из-за более низкого уровня оплаты труда, стоимости электроэнергии и других ресурсов.

Таким образом, очевидно, что без технического перевооружения и реорганизации действующих производств, инвестиций, повышения качества управления предприятиями создать действующую субконтрактинговую сеть будет невозможно.

Следующая тенденция совершенствования производства электродвигателей связана с реализацией принципа технологической специализации и состоит в появлении самостоятельных организационно-технологических звеньев – так называемых **сервис-центров.** Сервис-центры получают сырье, материалы и выдают потребителю готовые к сборке детали и узлы. Это позволяет обслуживать одним сервис-центром несколько предприятий–изготовителей электродвигателей, что в свою очередь избавит эти предприятия от содержания вспомогательных и заготовительных производств.

Такая специализация производства позволяет обеспечить применение наиболее прогрессивных технологических процессов, оптимизировать фондоёмкое оборудование, перейти на централизованное применение прогрессивных материалов. Поэтому стратегия развития производства электродвигателей предусматривает организацию определенного количества сервис-центров и сборочных производств, строящих свое взаимодействие на взаимовыгодных условиях и подчиняющихся одному координирующему органу.

Значительные эволюционные изменения происходят и в машиностроительных технологиях. При изготовлении электродвигателей порядка 30% трудозатрат приходится на механосборочные операции. Хотя доля альтернативных формообразующих технологий постепенно повышается, обработка резанием продолжает оставаться одной из основных технологических операций. От качества её исполнения во многом зависят виброакустические показатели электрической машины.

Сегодня превалирующей тенденцией развития технологии обработки материалов резанием является высокоскоростная обработка. Она даёт новые технологические возможности:

– большой съём материала в единицу времени позволяет повысить производительность обработки;

–меньшие силы резания приводят к меньшей деформации системы «станок – приспособление – инструмент – деталь», что повышает точность обработки и делает возможным обработку тонкостенных и не жёстко закреплённых деталей;

– в результате отвода тепла со стружкой уменьшается температурное воздействие на деталь, т.е. повышается качество обработанной детали и её точность;

– уменьшение подачи на оборот при точении и подаче на зуб при фрезеровании (при одновременном существенном повышении значений подачи в минуту) улучшает шероховатость поверхности;

– в целом ряде случаев может заменять абразивную обработку.

Технология высокоскоростной обработки применяется в первую очередь на станках типа «обрабатывающий центр». Эти станки позволяют сократить трудозатраты на изготовление детали за счёт аккумулирования ряда технологических операций. Немаловажным является тот факт, что данное оборудование позволяет сократить эксплуатационные и управленческие расходы за счёт уменьшения обслуживающего персонала.

Высокоскоростная обработка проявится при изготовлении всех основных деталей и узлов электродвигателя: в точении, фрезеровании, нарезании резьбы, шлифовании и других операциях, что позволит обрабатывающим центрам выполнять множество задач в массовом производстве. Разработки в области режущего инструмента также поддерживают эти высокие скорости – это новые субмикронные виды карбида, покрытия CVD, PVD и передовые инструментальные материалы. На тех операциях, где до сих пор нужны специализированные станки для специфического применения, станкостроители уже предлагают улучшенные конструкции такого оборудования.

Черновая обработка металла уступает место изготовлению заготовок точной формы. Получение окончательного контура заготовки с точки зрения формы, точности размеров и качества поверхности не только снижает количество операций на одну деталь, но и смещает акцент на еще более высокие скорости финишной обработки. Всё большее развитие получают технологии прессования изделий из металлопорошков, синтетических и полимерных

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

материалов. Развиваются технологии пластического деформирования методом накатывания, обкатывания, калибрования, экструдирования, технологии получения точных заготовок и готовых изделий на вырубных прессах с ЧПУ многоинструментальными головками, струйной водообразивной и лазерной резкой, сложной гибкой и пр.

Наряду с принципиально новыми способами получения заготовок деталей электродвигателя «второе дыхание» приходит и к уже давно известным технологиям. Эта тенденция относится и к получению точных заготовок из алюминиевых сплавов методом литья под давлением. Например, ротор асинхронного электродвигателя – это сложная и конструктивно нетехнологичная отливка. Заливка короткозамкнутых роторов производится почти всеми известными в технике литейного производства способами: в обычные металлические формы, центробежным способом, литьём под высоким давлением, вибрацией формы при заливке, под низким давлением, жидкой штамповкой, литьём под вакуумом и др. На многих заводах в России и за рубежом заливка роторов производится на стандартном универсальном оборудовании, а большие отливки роторов изготавливаются на самодельных установках. Современный способ литья роторов под средним удельным давлением на специализированных машинах объединяет преимущества описанных выше методов и одновременно лишён их недостатков.

Альтернативой методу литья корпусных алюминиевых деталей под давлением, например, служит метод получения станин электродвигателей экструзией. Выбор в данном случае того или иного метода основывается не столько на технологических аспектах, сколько на экономических. Себестоимость станины, полученной методом экструзии, выше, чем литой, вследствие большего количества операций её окончательной обработки.

Чугунолитейное производство в электромашиностроительной отрасли сегодня серьёзно отстаёт от соответствующих предприятий зарубежных промышленно развитых стран. Ведущие фирмы западных стран контролируют и поддерживают инвестициями поставщиков литых заготовок, но и требуют от них выполнять все технические требования (материал, точность размеров, отсутствие дефектов и др.). В России «рынка отливок» ещё нет. Фактически пропущен полный цикл технического обновления литейного производства, который произошел в мире, и мы остались на уровне 70–80-х годов.

Усложнение литых деталей и необходимость частых изменений их конфигурации обусловливают новые требования к производству отливок. Оно должно быть гибким, способным серийно производить широкую номенклатуру отливок. Повышение сложности, тонкостенности и точности литых деталей вместе с требованиями минимизации трудовых затрат и эффективности защиты окружающей среды от загрязнения производственными отходами определяют основные направления развития технологии. Основной тенденцией в применяемых литейных сплавах для деталей электродвигателей является расширение использования чугунов с шаровидным (ЧШГ) и вермикулярным графитом взамен серого чугуна. Замена серого чугуна на ЧШГ обусловлено возросшими требованиями к прочностным характеристикам корпусных деталей электродвигателя, требованиями снижения расхода энергоресурсов и материалоёмкости.

Наиболее специализированными в производстве электродвигателей являются операции получения сердечников статора и ротора и обмоточно-изолировочные работы. В производстве сердечников из-за низкого коэффициента использования электротехнической стали (обусловленного спецификой их конструкции) основные технологические новинки касаются снижения материальных затрат. В технологии обмотки основные направления поиска – новые изоляционные материалы, надёжность и долговечность электродвигателя, переход от ручного труда при изготовлении обмоток к механизированному. Причём последнее обусловлено не только стремлением повысить производительность труда, но и растущим недостатком квалифицированных рабочих, способных выполнять эти весьма тяжёлые операции вручную.

Важным элементом в современном производстве является наличие системы активного контроля над состоянием инструмента, детали, приспособления в процессе работы оборудования с использованием ультразвука, лазеров и других инженерных решений. Система контроля должна быть адаптирована с системой ЧПУ в данном процессе.

Бурное развитие электроники и снижение её стоимости позволяют оснащать технологическое оборудование устройствами автоматической оптимизации скорости, точности обработки, расхода инструмента, дистанционной диагностики неисправностей и других параметров. В конечном итоге это снижает себестоимость изделий и повышает качество.

Несмотря на существование «модных» тенденций развития дизайна среди ведущих производителей электродвигателей и желание каждого иметь свое неповторимое «лицо», основные требования заказчика предъявляются к качеству окрашивания

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

изделия, долговечности покрытия и спектру цветов. На сегодняшний день порошковое статическое напыление является передовой технологией полимерного порошкового окрашивания металла. Основными преимуществами сухих полимерных покрытий являются:

– коррозионная и химическая стойкость;

– устойчивость к истиранию и образованию царапин;

– ударная прочность и эластичность;

– отсутствие огнеопасных и токсичных растворителей;

– отличный декоративный внешний вид.

Но как показала практика, современные технологии отделки внешних поверхностей электродвигателя предъявляют высокие требования к подготовке поверхности под окраску, причём для порошковой окраски эти требования выше, чем для жидких покрытий. Так что качество поверхности корпусных деталей электродвигателя должно быть достигнуто технологией их изготовления, а не дополнительными финишными операциями по их зачистке перед окраской.

На производителя товара, кроме естественного давления развивающихся технологий также воздействуют: глобальное соревнование на рынках, экономический спад, ответственность за всю продукцию, растущий недостаток квалифицированных рабочих и инженеров и др.

Организация, которая хочет преуспеть в новой внешней среде должна работать над постоянными улучшениями, касающимися как технологий, качества продуктов и услуг, так и менеджмента.

Агентно-ориентированное программирование как реализация фреймового представления знаний об электрической машине в интеллектуальных САПР

КОБЕЛЕВ А.С.

Обсуждаются базовые возможности инструментальных средств САПР. и возможности интеллектуальной надсистемы, которая бы позволила управлять знаниями с использованием САПР-инструментария. Сделан обзор авторских работ, связанных с применением экспертных систем для создания программ расчётного анализа АЭД, показан пример использования экспертного программирования в конструкторской подсистеме. Описана технология агентно-ориентированного программирования с учётом специфики реализации в электромашиностроительных САПР.

Base possibilities of tools of a CAD and possibility intelligent superstructure, which would allow controlling knowledge with usage of CAD - TOOLKIT, are discussed.

The review of the author's transactions connected to application of consulting models for creation of programs of AM calculated analysis is made, the example of use of expert programming in a designer subsystem is shown.

The technology agent-oriented programming is described in view of specificity of realization in an electromachine-building CAD.

Проблема полнофункциональной интегрированной САПР низковольтных АЭД впервые была поставлена в [1], где начат разговор о необходимости передачи результатов электромагнитных, тепловых и иных инженерных расчётов в конструкторскую подсистему, а также об использовании типовых деталей (но не типовых элементов деталей) для построения сборочных чертежей. Предусматривалось наличие блока параметрической оптимизации. Высказывалась спорная идея о создании единой графоаналитической модели АЭД общего применения, разработанной "на основе многолетней практики машиностроения", причём большинство конструктивных размеров предлагалось сделать функцией размеров активной части, прежде всего D_a. Со времени публикации [1] прошло около 30 лет. Широкомасштабные работы, проводившиеся по конструкторским САПР низковольтных АЭД в 80-е годы прошлого века [2], давно свернуты. Упование на самодостаточность сервиса 2D- и 3D-CAD-систем, пик которого пришёлся на конец 90-х годов XX в., оправдало себя не в полной мере. Назовём некоторые нерешённые проблемы "сапростроения":

– не решена задача архивации выполненных электронных проектов, включающих варианты и "подварианты" исполнения отдельных узлов и деталей

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

и сопутствующая задача автоматизированной генерации конкретного, единичного экземпляра из группового чертежа;

– использование CAD-систем в основном идёт по технологии "компьютерных кульманов" быстро и удобно ***вручную*** начертить (смоделировать) экземпляр ЭМ с характеристиками, представленными в ТЗ; поэтому актуальная проблема автоматизированного ***структурно***-параметрического синтеза ЭМ до сих пор не решена;

– конечно-элементные пакеты 2D-, 3D- моделирования физических полей в ЭМ, стыкующиеся с 2D-, 3D-CAD-системами, пока мало востребованы, поскольку большинство заводских нормалей по электромагнитному и тепловому расчёту низковольтных АЭД базируются, соответственно, на электрических и тепловых схемах замещения; точность расчёта по этим нормалям, постоянно пополняемым знаниями расчётчиков-экспертов, обычно удовлетворительна для заводской практики проектирования; задача интеграции CAD-систем с цепными методиками расчёта полностью не решена.

Названные задачи являются лишь вершиной айсберга проблемы извлечения знаний у экспертов-электромехаников, их формализации и программирования компьютерных баз знаний.

Несмотря на перечисленные проблемы в настоящее время наблюдается явный дефицит исследований и публикаций, посвящённых разработке интеллектуальных интегрированных САПР ЭМ. Автор настоящей статьи в своих исследованиях делает попытку восполнить названный пробел.

Разделение "полномочий" между инструментальными средствами САПР и интеллектуальной надстройкой

Полнофункциональная электромашиностроительная САПР должна быть, по меньшей мере, трёхсоставной и содержать:

1. Инструментальные средства САПР CAE/CAD/CAM/PDM/PLM оболочки.

2. БД, содержащие:

– данные о материалах, стандартных изделиях, входящих в проектируемые ЭМ и т.п.;

– информацию о ранее спроектированных экземплярах ЭМ (в идеале **всю** совокупность их физических, технико-экономических и геометрических свойств).

3. Базы знаний (БЗ), хранящие математические модели и экспертные знания о предметной области (методы и приёмы расчёта и конструирования).

В системах, использующих принцип распределенного искусственного интеллекта, следует различать и четвёртую составляющую САПР – программы, осуществляющие автоматизированную коммуникацию между распределёнными БЗ, описывающими различные группы свойств объекта и правила их синтеза.

В свете обсуждаемой темы следует чётко провести грань между **базовыми** возможностями инструментальных средств и возможностями интеллектуальной надсистемы, которая бы позволила управлять знаниями с использованием САПР-инструментария.

За инструментарием закрепляются следующие функции:

– ручное создание параметризированной[1] геометрической модели;

– автоматическая передача изменений от детали к сборке и наоборот ("тяжёлые" системы могут автоматически передавать технологическую эволюцию детали, если в узле она подвергается обработке)[2];

– передача модели из конструкторской подсистемы в подсистему проектирования технологической оснастки и далее в подсистемы автоматизированной генерации управляющих программ для станков с ЧПУ[2];

– передача геометрической модели в МКЭ-расчётную подсистему;

– чёткий поиск аналога.

За интеллектуальной надсистемой, которая, как правило, выходит за рамки базового САПР-инструментария, но должна иметь с ним дружественный интерфейс, следует закрепить следующие функции:

1. ***Создание инженерных методов расчёта***, использующих экспертные знания (характерно для тепловентиляционных и, отчасти, электромагнитных расчётов ЭМ). Желательно создание таких методов на подмножестве естественной технической лексики в среде экспертного программирования. Перевод цепных методик в экспертные системы для КБ заводов весьма актуален, поскольку позволит: сохранить бесценный опыт поколений расчётчиков; оперативно использовать критериально обработанные результаты экспериментов; вносить изме-

[1] В КБ, использующих 2D-моделлеры, аппарат параметризации практически не применяется.

[2] Возможности автоматически реализуются только в 3D-моделлерах.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

нения в программы непрограммирующим специалистам по электротехническим знаниям.

2. ***Создание семантических (смысловых, понятийных) описаний класса проектируемых объектов или онтологий***, что позволяет упростить организацию исчерпывающих БД аналогов, электронных архивов и применять методы искусственного интеллекта в процессе проектирования. По нашему мнению, создание полного семантического описания модели ЭМ единственная стартовая платформа, с помощью которой можно интеллектуализировать расчётно-конструкторские САПР.

3. ***Создание экспертных баз знаний не только для расчётной и конструкторской,*** но и других подсистем САПР, например, для технологической подсистемы – подбор инструмента в зависимости от требований к обработке детали; способ транспортировки изделия в зависимости от его массы и т.д.

4. ***Организация нечёткого поиска аналогов*** при наличии значительных БД спроектированных экземпляров.

5. ***Автоматизация элементов поискового конструирования***. Здесь первая группа задач связана с автоматизацией хорошо формализуемых сценариев: например, по результатам взаимосвязанного электромагнитного и теплового расчётов регулируемого АЭД при превышении допустимой температуры обмотки статора перейти от обдува наружной поверхности вентилятором, смонтированным на валу, к вентиляции от независимого устройства. Вторая, более сложная в реализации группа задач – программирование полуэвристических приёмов, используемых опытными конструкторами.

6. ***Организация поиска оптимального варианта ЭМ*** с применением эволюционного моделирования и, прежде всего, генетических алгоритмов, позволяющих использовать опыт совокупности ранее полученных решений.

7. ***организация интеграции между подсистемами САПР,*** а также между системой САПР и АСУ.

Следует отметить, что ведущие производители САПР-инструментария все более готовы работать с базами знаний и, помимо геометрического моделирования, поддерживать концептуальное и функциональное моделирование [3]. В контексте обсуждаемой проблемы следует указать инструмент **DASSAULT SYSTEMES (CATIA – Knowledge Advisor** и разработку **EDS (Unigraphics Solutions)**, реализующую технологию **Knowledge Fusion**. Названные продукты созданы для разработки интеллектуальных моделей и процедур на языке инженерных знаний, реально позволяя использовать уже накопленный опыт проектирования. Обе фирмы, называют такой подход принципиально новым и даже революционным [4, 5]. Возможность работы с БЗ имеется и в **Pro/Engineer** при использовании инструмента **Pro/Notebook** и каркасных моделей сборки (Skeletons). Заметим, что о разработке интеллектуальных моделей при автоматизированном проектировании электрических машин на базе инструментальных средств **СПРУТ** говорилось нами ещё в 1999 г. [6].

В наших работах для интеллектуализации САПР ЭМ используются следующие методы и технологии искусственного интеллекта:

– представление знаний об электрической машине системой фреймов [7];

– экспертные системы и экспертное программирование;

– агентно-ориентированная реализация фреймов;

– использование нечётких множеств и отношений;

– использование генетических алгоритмов.

Экспертное программирование

Технология экспертного программирования в экспертной среде **SprutExpro** с использованием продукционных правил и модулей инженерных знаний (МИЗов) достаточно подробно освещена в [8, 9]. Эти работы посвящены разработке расчётной подсистемы САПР: [8] – базе знаний "Электромагнитный расчёт низковольтных трёхфазных АЭД", [9] – базе знаний "Тепловентиляционный расчёт низковольтных АЭД". Упоминание о базе знаний "Электромагнитный расчёт асинхронных конденсаторных двигателей" можно найти в [10]. Все три программы открытого доступа, написаны на подмножестве естественной технической лексики, внедрены на ряде электротехнических предприятий и используются в повседневной практике проектирования.

Разумеется, экспертную систему целесообразно использовать и в конструкторской подсистеме. Так, для примера п.5 при конкретизации ряда входных свойств справедлив МИЗ (таблица).

Если рассматривать МИЗ **М1** как продукционное правило, он эквивалентен следующему предложению: "Если серия двигателя – АИ, привязка мощности – *Р*, исполнение по защите и охлаждению – "закрытое с внешним обдувом", электрическая модификация – "частотно-регулируемый", высота оси

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Модуль инженерных знаний: М1

Наименование: **Выбор способа охлаждения и варианта эскиза сборочного чертежа**

	Наименование свойств	Имя	Условие, значение	
Вход и управление	Наименование серии	TYPE	"АИ"	
	Привязка мощности к установочным размерам	DIM_POW	"Р"	
	Исполнение по защите и охлаждению	ENLCOSUR	"Закрытое с внешним обдувом"	
	Электрическая модификация	EL_MOD	"Частотно-регулируемый"	
	Высота оси вращения	FRM_SIZE	100	
	Установочный размер по длине станины и сердечника	BASE_LEN	"Станина L"	
	.....	.....	.....	
	Класс нагревостойкости изоляции	INSULAT	"F"	
	Среднее превышение температуры обмотки статора	TTStcuAv	[110,)	
Выход	Способ охлаждения по ГОСТ 2059	COOLING	Механизм	0641
	Эскиз сборочного чертежа	Sketch_Asmbl_Drw	Механизм	Вызов программы генерации эскиза сборочного чертежа по входным свойствам и COOLING

вращения – 100 мм, установочный размер по длине станины – *L*, ...; класс нагревостойкости – F, среднее превышение температуры обмотки статора – более 110°С, то:

– следует, по ГОСТ 2059, выбрать способ охлаждения 0641 (для цепи с вторичным хладагентом вентиляция осуществляется с помощью независимого устройства, установленного на машине);

– агент «Эскиз сборочного чертежа» должен сгенерировать эскиз в варианте, назначенном указанными входными свойствами и **COOLINC** (определённым по значению **TTStcuAv**, переданным в МИЗ **М1** конструкторской подсистемы из связанного электромагнитного и теплового расчётов).

Агентно-ориентированное программирование как реализация фреймового представления знаний

Существуют два варианта **программной реализации** фреймовой модели представления знаний:

1. Реализация на основе специализированных фреймовых языков, например, FRL (Frame Representation Language), KPL (Knowledge Representation Language).

2. Реализация на основе объектно-ориентированного программирования (ООП), когда проводится однозначное соответствие понятиям шаблон фрейма и класс, экземпляр фрейма и объект.

В наших исследованиях реализация фреймов осуществляется в терминах ООП, на базе языка Sprut и языка экспертного программирования SprutExpro.

При создании интеллектуальной САПР, долженствующей **выступать** при решении части задач проектирования **от имени пользователя**, одним из ключевых вопросов является **активность** объектов. В классическом ООП объекты САПР являются пассивными: они не могут анализировать своё поведение, определять характер своих связей с другими объектами, в них отсутствует механизм формирования целей [11]. Для активизации САПР весьма продуктивной оказалась теория многоагентных систем, представляющая класс проектируемых объектов в виде коллектива иерархически организованных агентов, содержащего основные свойства и методы объектов, методы анализа электромеханического устройства в целом и интенциональные характеристики агентов. Под интенцией будем понимать направленность на решение задачи.

Назовём некоторые из возможных активных действий агента САПР:

1. Выполнить точно указание вышестоящего агента (сгенерировать чертёж, передать значение свойств, вызвать программу).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

2. Не выполнить указание вышестоящего агента с объяснением причины отказа (отсутствие необходимых данных, их противоречивость).

3. Предложить набор вариантов решения задачи (опираясь на входные определяющие свойства).

4. Выполнить приближённо указание вышестоящего агента (причём выполнить с наибольшим приближением, в рамках неполной и неточной информации, содержащейся в имеющихся БД и БЗ).

Последний пункт возможен только с использованием технологии мягких вычислений (soft computing) [12]. Заметим, что реализация САПР АЭД по состоянию [13], не предусматривала отработки п. 4.

Основная цель многоагентной САПР (МАСАПР) – автоматизированная генерация комплекта документации на разрабатываемое изделие. Эту искусственную деятельность контролирует и направляет человек, отвечая на вопросы, которые задает ему МАСАПР, анализируя автоматически сгенерированные чертежи и изменяя при необходимости параметры объектов, входящих в проект.

Метаагентом МАСАПР ЭМ является интегрированная модель электрической машины, взаимодействующая с БЗ, содержащей математические методы моделирования ЭМ (рисунок).

Среда, с которой взаимодействуют агенты САПР, представляет собой текущее состояние проекта и знания эксперта в контексте выполняемого проекта.

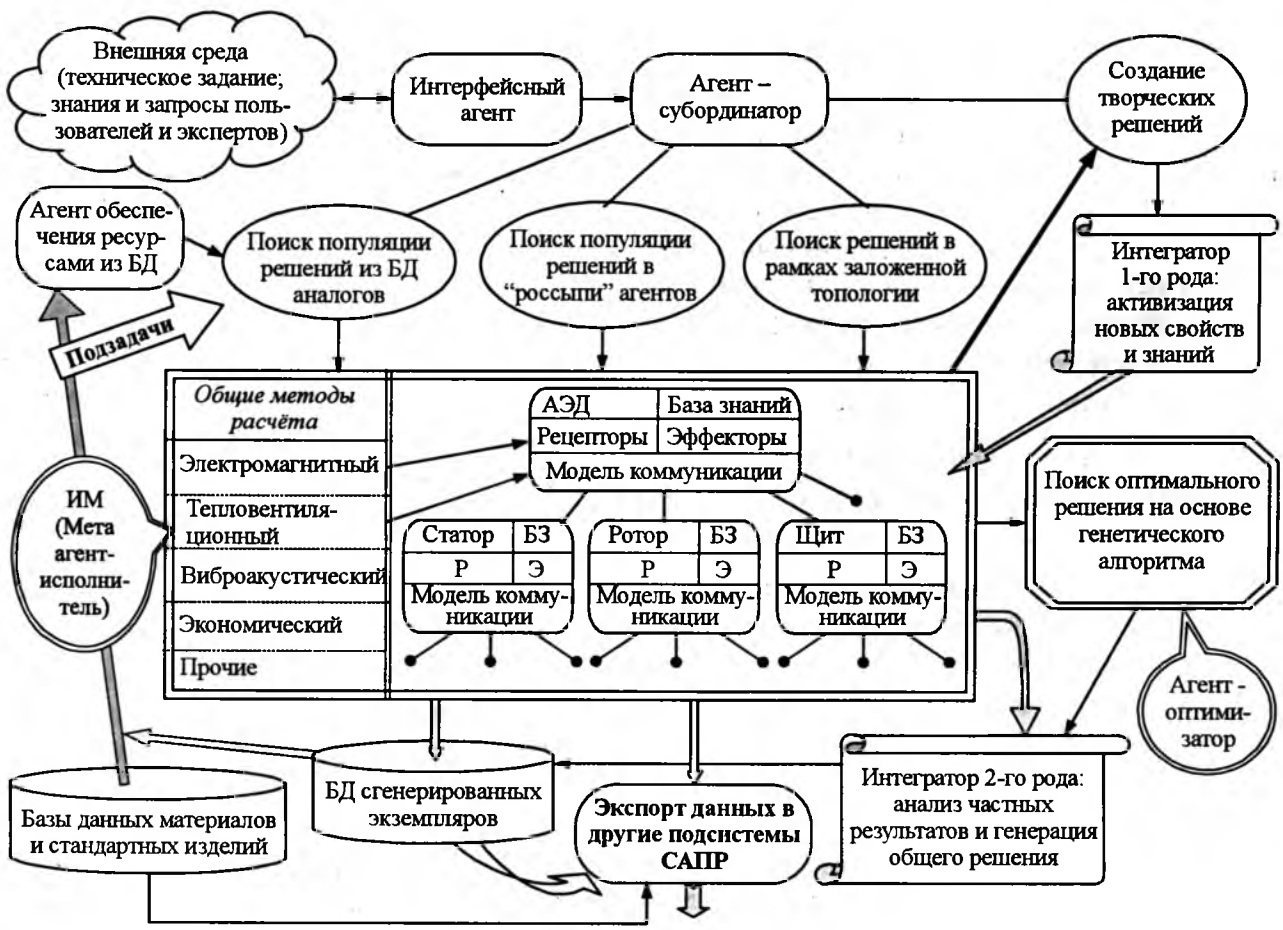
Свойства агента САПР могут принадлежать трём различным категориям: импортируемым, экспортируемым и внутренним. Импортируемые свойства являются рецепторами агента САПР, формирующими его систему восприятия. Экспортируемые свойства агента САПР являются его эффекторами, функция которых состоит в воздействии на среду, т.е. на состояние проекта.

База знаний агента САПР содержит его собственные методы, подсистему рассуждений, модуль формирования целей и оценок ситуации.

Модель коммуникации содержит описание протоколов коммуникации агента с другими агентами и пользователем.

Поясним собственно технологию агентно-ориентированного программирования электромашиностроительной САПР. Агент $\mathbf{A_i}$ МАСАПР описывается набором:

$$\mathbf{A_i = <ORG_i, R_i, MTg_i, ACT_i>}, \qquad (1)$$



Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где $\mathbf{ORG_i}$ – множество структур, сформированных и формируемых в процессе действий агента; $\mathbf{R_i}$ – множество отношений и связей между агентом $\mathbf{A_i}$ и другими агентами, а также средой и пользователем; $\mathbf{MTg_i}$ – геометрические методы агента (а также иные собственные методы агента, например, расчёт массы); $\mathbf{ACT_i}$ – набор сценариев диалога или, шире, набор действий агента.

В свою очередь:

$$\mathbf{ORG_i = < (Nm_i, G_i, Ch_i, Df_i), Conl_i >}, \quad (2)$$

где $\mathbf{Nm_i}$, $\mathbf{G_i}$, $\mathbf{Ch_i}$, $\mathbf{Df_i}$ – свойства, входящие в тезаурус МАСАПР, соответственно: имя объекта; верхние свойства, определяющие объект как класс; характеристические признаки, позволяющие различать различные параметризированные экземпляры одного класса; дифференциальные признаки, позволяющие описать конкретный экземпляр объекта.

Наиболее характерные ранее спроектированные экземпляры помещаются в объектно-ориентированную БД готовых проектов. Программно устанавливается подгруппа конструкторских свойств $\mathbf{Chd_i} \subset \mathbf{Ch_i}$, активизируемых через диалог:

$$\mathbf{R_i = Conl_i \cup Con2_i \cup Con3_i}, \quad (3)$$

где $\mathbf{Conl_i}$ – валентные признаки, позволяющие программировать вложенную структуру объектов; $\mathbf{Con2_i}$ – признаки, устанавливающие взаимосвязи между геометрическими методами, значением свойств $\mathbf{G_i}$ и $\mathbf{Ch_i}$ и кортежами значений атрибутов из БД экземпляров $\mathbf{E_i}$; $\mathbf{Con3_i}$ – связи между расчётными и графическими свойствами агента.

Здесь же определяется последовательность передачи расчётных свойств. Совокупность $\mathbf{ORG_i}$ и $\mathbf{R_i}$ представляет собой онтологию агента $\mathbf{A_i}$.

В генетическом алгоритме целевая функция задается неявной моделью, поэтому на каждом поколении происходит обращение к расчётным базам знаний **MTc**. С другой стороны, оптимизируемая геометрия активных частей из выходных данных **MTc** передаётся в геометрические методы, поэтому в эволюционном моделировании опосредованно участвуют и **MTg**. На завершающем этапе целесообразно программировать персональные экспертные знания **Exp**, используемые в практике проектирования. В связи с этим, можно говорить о множестве эволюционных стратегий

$$\mathbf{EV = < Gen, MTg, MTc, Exp >}, \quad (4)$$

которые поручаются агентам и системе в целом.

Тогда имеем следующее описание многоагентной электромашиностроительной САПР, содержащей множество активных агентов **A** и пассивных объектов **U** [14]:

$$\mathbf{MAS_{ЭМ} = < A, U, E, ACT, R, EV, ORG >}. \quad (5)$$

Рамки статьи не позволяют остановиться на ещё двух методах ИИ:

– нечётких отношениях, позволяющих: математически описать взаимодействия между агентами САПР; выбрать аналог при неполном соответствии между верхними свойствами проектируемого устройства и таковыми свойствами для любого из экземпляров, содержащихся в БД аналогов;

– генетических алгоритмах, использующих аналогии естественных процессов рекомбинации и селекции, работающих с популяциями решений и позволяющих максимально учесть опыт прошлых разработок.

Краткое упоминание об этих методах можно найти в [10, 15]. Более подробно о технологиях soft computing автор надеется рассказать в последующих публикациях.

Выводы

1. Объединение методов математического моделирования АЭД, знаний экспертов-электромехаников, методов искусственного интеллекта, активизирующих и интегрирующих эти знания, использование компьютерной платформы, эффективно аккумулирующей и отображающей эти знания, позволило разработать методологию интеллектуальной САПР АЭД, органически сочетающей требования интеллектуализации, интеграции и индивидуализации, сделать САПР персональным ассистентом пользователя.

2. Описываемая методология построения интеллектуальных САПР позволяет эффективно осуществлять активизацию ранее созданных расчётно-конструкторских знаний, включая уникальный персональный опыт, не вошедший в руководства по проектированию АЭД.

Список литературы

1. **Кузнецов Б.И., Смирнов Б.В., Харламов В.П.** К вопросу построения графоаналитической модели автоматизированного проектирования асинхронных двигателей // Электротехника. 1978. № 9. С. 18–21.

2. **Воскресенский А.П., Геминтерн В.И., Кузнецов Б.И. и др.** Система проектирования асинхронных двигателей // Электротехника. 1987. № 2. С.46–50.

3. **Репортаж** с ежегодного PLM Форума, проводимого IBM и Dassault Systemes в Москве // САПР и графика. 2004. № 10. С. 44–47.

4. **CATIA:** орудие производителя XXI века //САПР и графика. 2000. № 4. С. 32–36.

5. **Чиж О.** Unigraphics версии 16 – новые революци-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

онные технологии, новые непревзойдённые возможности // САПР и графика. 2000. № 4. С. 63–65.

6. **Евгенев Г.Б., Кобелев А.С., Кузьмин Б.В., Крючков А.А.** Перспективы использования новой технологии автоматизированного решения инженерных задач для проектирования электрических машин // Электротехника. 1999. № 11. С. 1–12.

7. **Кобелев А.С.** Эффективность использования фреймового представления знаний для организации интеллектуальных САПР электрических машин // Электротехника. 2005. № 5. С. 18.

8. **Кобелев А.С.** Организация расчётной подсистемы САПР АД на базе системы экспертного программирования SprutExpro // Изв. вузов. Электромеханика. 2002. № 5. С. 16–21.

9. **Тубис Я.Б., Кравчик А.Э., Кобелев А.С.** База знаний "Тепловентиляционный расчёт асинхронных двигателей"-как составная часть расчётной подсистемы интеллектуальной САПР АЭД // Электротехника. 2004. № 5. С. 2–8.

10. **Kobelev A.S.** Efficiency of application of multi-agent CAD for high-used asynchronous electric motors designing // Proceedings of the 6TH international conference on unconventional electromechanical and electrical systems. Alushta, Ukraine, 24–29 September 2004. Vol. 2. P. 353–358.

11. **Тарасов В.Б.** От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС. 2002.

12. **Ярушкина Н.Г.** Основы теории нечётких и гибридных систем: М. Финансы и статистика. 2004.

13. **Кобелев А.С.** Автоматизированное проектирование низковольтных асинхронных двигателей с использованием интегрированных моделей электрических машин // Электричество. 2004. № 2. С. 31–38.

14. **Кобелев А.С.** Методология построения интегрированных моделей асинхронных двигателей для интеллектуальных САПР // Электротехника. 2004. № 5. С. 2–6.

15. **Евгенев Г.Б., Кобелев А.С.** Использование нечётких множеств и генетических алгоритмов в интеллектуальных машиностроительных САПР // Тр. Международных научно-технических конференций "Интеллектуальные системы"(IEEE AIS'04) и "Интеллектуальные САПР" (CAD-2004). Т. П. М.: Физматлит, 2004. С. 33–39.

Опыт практического применения комплекса Pro/ENGINEER в автоматизированном проектировании электрических машин

КРУГЛИКОВ О.В., ЗАЙЦЕВ А.М., ДРАГОМИРОВ М.С., ВЕРШИНИН А.В., СИЖАНОВ И.С.

Обобщён опыт применения современной системы трёхмерного твёрдотельного моделирования и расчёта Pro/ENGINEER при проектировании новой техники в области электромашиностроения. Приведены примеры эффективного решения различных конструкторско-технологических задач. Показано, что применение современных САПР при проектировании и расчёте электрических машин в совокупности с системой управления данными разработки позволяет значительно повысить производительность команды разработчиков и обеспечить высокую конкурентоспособность новых изделий.

There were summarized the experience of using the modern system for solid-state modeling and Pro/ENGINEER calculation during designing of new technics in electric machine industry field. There were made examples of different design – technology tasks effective execution. There were showed that using of modern CAD system during designing and calculation of electrical machines in aggregate with system of managing the data gives a possibility to increase greatly the productivity of designing team and to ensure high competitiveness of new products.

Быстрое развитие вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения привело к тому, что процесс проектирования современных конкурентоспособных изделий стал немыслим без применения систем автоматизированного конструирования – CAD (Computer Aided Design), автоматизированной подготовки производства – CAM (Computer Aided Manufacturing) и автоматизированного инженерного анализа и моделирования -CAE (Computer Aided Engineering). Практически все программы, реализующие указанные возможности, основываются на трёхмерном представлении изделия, которое позволяет работать с математической твёрдотельной моделью как с физическим прототипом. Данный подход стал стандартом проведения инженерных разработок не только за рубежом, но и на ведущих российских предприятиях.

Современные САПР обладают следующими неоспоримыми преимуществами:

– наглядное представление отдельных деталей и конструкции в целом;

– возможность ещё на ранних стадиях проекта проанализировать взаимодействие деталей в сборке;

– быстрое внесение изменений, которые будут отражены у всех участников проекта на всех элементах проекта (деталь, сборка, чертёж, технологическая оснастка, управляющая программа для станка с ЧПУ);

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

– возможность создания различных модификаций конструкции, позволяющая сравнить различные варианты исполнения изделия.

Всё это приводит к сокращению сроков разработки при уменьшении количества ошибок и естественном повышении качества конечного результата.

Однако, несмотря на широкие возможности современных САПР, в настоящее время сложно привести пример программы, в которой бы не требовалось участие квалифицированного специалиста. Следует отметить, что по-прежнему главными остаются понимание анализируемого процесса, владение спецификой предметной области и методиками расчётов. В связи с этим решение вопроса подготовки специалистов, владеющих современными инструментами конструктора и технолога, становится особенно важным.

После изучения всего спектра предлагаемых CAD/CAM/CAE – программ нами была выбрана система Pro/ENGINEER компании "Parametric Technology Corporation" (США). Данная программа, являясь САПР высокого уровня, наиболее полно отвечает предъявляемым требованиям и соответствует уровню решаемых задач.

Pro/ENGINEER представляет собой объектно-ориентированную параметрическую систему проектирования (как твёрдотельного, так и поверхностного). Наряду с ранее описанными возможностями подобных систем Pro/ENGINEER имеет ряд преимуществ. Программа ориентирована на мышление инженера и оперирует инженерными терминами, поэтому подход к построению деталей и созданию сборок представляется совершенно естественным и интуитивно понятным. Кроме того, программа может быть легко адаптирована под специфические требования пользователя.

Для управления процессом разработки изделий в условиях параллельной работы специалистов различных инженерных подразделений нами всегда, вне зависимости от сложности разработки, используется PDM-система Pro/INTRALINK. Данный пакет необходим для организации работ в соответствии с международными стандартами управления качеством изделия ISO 9000 – ISO 9006. Работа с данными в системе Pro/INTRALINK позволяет отследить все изменения, внесённые в проект, организовать иерархичность в правах на коррекцию документации, исключить несанкционированный доступ к документации и произвольное изменение её лицами, не имеющими соответствующих прав. Являясь, по сути, надстройкой над Pro/ENGINEER, Pro/INTRALINK существенно повышает производительность команды разработчиков за счёт реализации следующих возможностей:

– управление параллельным доступом к данным проекта и их модификациям;

– обмен информацией о проекте по мере его развития;

– гибкий доступ к данным для всех разработчиков изделия в зависимости от их конкретных задач и уровня квалификации.

Описанные возможности наиболее полно реализуются при следующей организации работ по проектированию новых изделий:

1. На первом этапе определяются как основные этапы разработки в зависимости от поставленной задачи, так и количество задействованных исполнителей различных инженерных подразделений. Важной задачей администратора проекта на этом этапе является формирование эффективной команды разработчиков.

2. В существующей базе данных с помощью Pro/INTRALINK создается новая ветвь, позволяющая объединить все данные будущего проекта в единый архив информации, а также разграничить права доступа к архиву и обязанности каждого из его участников.

3. Проводится концептуальная конструктивная проработка изделия на основе предварительно проведенных поверочных расчётов, что обеспечивает требуемые характеристики изделия. Проработка ведётся с использованием встроенного компоновщика (Layout) и скелетной сборки (Skeleton) или реализуется непосредственно в трёхмерном твёрдотельном варианте. При этом может быть создано целое семейство модификаций изделия для их дальнейшего анализа. Кроме того, как правило, на этом же этапе просматриваются основные идеи дизайна будущего изделия.

4. Предварительная оценка возможностей и способов изготовления изделия различными технологическими подразделениями. На этом этапе определяется необходимое оборудование и закладываются основы для проектирования технологической или литейной оснастки.

5. С помощью систем инженерного анализа и моделирования проводится отработка характеристик изделия и уточняются конструктивные параметры. Здесь могут использоваться самые разнообразные программные средства как произведённые самим разработчиком на основе накопленного опыта, так и универсальные расчётные программы, использующие твёрдотельные модели вариантов изделия в качестве объектов вычислительных экспериментов. Примером подобных программ может служить модуль Pro/MECHANICA для расчёта динамических характеристик, тепловых процессов и напряжённо-деформированного состояния или специализирован-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ные комплексы ANSYS, NASTRAN, COSMOS/M, FEMLAB и др.

Необходимо отметить, что два последних этапа наиболее целесообразно проводить параллельно, чтобы существенно сократить сроки разработки. Обмен актуальными данными проекта при этом будет осуществляться автоматически при помощи Pro/INTRALINK.

6. Доработка трёхмерной модели по результатам экспертных оценок технологов и металлургов, а также с учётом рекомендаций группы инженерного анализа.

7. Параллельно предыдущему этапу проводится проектирование необходимой технологической оснастки с помощью модулей Pro/MOLDESIGN, Pro/CASTING и Pro/SHEETMETAL и генерация управляющих программ для станков с ЧПУ с помощью модуля Pro/NC, а также создание конструкторской документации.

8. На последнем этапе разработки, если это необходимо, может быть изготовлен физический прототип будущего изделия с помощью средств быстрого прототипирования.

При этом необходимо отметить, что большую часть времени участники проекта оперируют лишь трёхмерными моделями изделия, содержащими всю необходимую информацию. Конструкторская и технологическая документация оформляется лишь на заключительных этапах, когда уже согласованы все основные вопросы по конструкции и технологии изготовления.

В результате реализации проекта в едином электронном архиве информации формируется библиотека знаний инженера относительно выполненного проекта – скоординированная электронная модель изделия и база специальных и общетехнических данных. Ценность всей базы данных, содержащей различные разработки, постоянно повышается, так как новые данные могут быть использованы при дальнейшей работе.

С использованием описанной методики на предприятии был успешно реализован целый ряд проектов по разработке новой техники, что подтвердило эффективность применения современных CAD/CAM/CAE – систем высокого уровня и соответствующей системы управления данными разработки.

Одной из важных проблем современного электромашиностроения является организация эффективного охлаждения двигателей при соблюдении возрастающих требований по уровню шума.

С помощью Pro/ENGINEER была построена твёрдотельная модель вентиляционного узла двигателя и проведена его оптимизация с учётом особенностей реального вентиляционного тракта. Целью

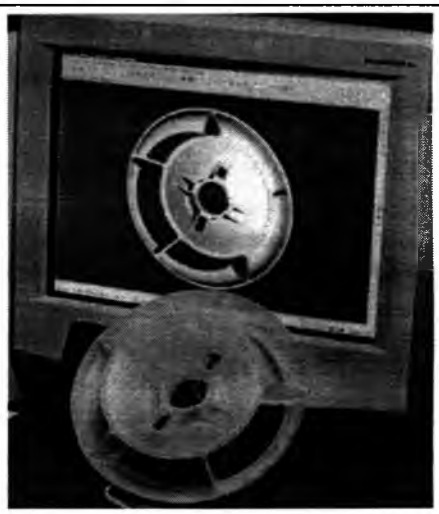


Рис.1. Прототип вентилятора для исследования аэродинамических характеристик

моделирования газодинамических характеристик вентилятора в трёхмерной постановке задачи было снижение вентиляционных потерь при увеличении обеспечиваемого расхода и уменьшении шума. В результате проведения серии вычислительных экспериментов с различными модификациями вентилятора была получена конструкция, прототип которой был построен с помощью средств быстрого прототипирования методом стереолитографии[1] (рис.1). Результаты предварительных испытаний подтвердили эффективность найденного решения.

Таким образом, рациональное сочетание трёхмерного представления геометрии изделия, моделирования его работоспособности и прототипирования позволило значительно сократить сроки разработки и улучшить показатели применяемого вентилятора.

Ещё одним примером реализации возможностей Pro/ENGINEER на практике может служить использование модуля Pro/NC для создания управляющих программ для станков с ЧПУ. На сегодняшний день понятно, что применение в инструментальном или основном производствах современных обрабатывающих центров с ЧПУ не только обеспечивает лучшее качество, но и существенно сокращает трудоёмкость обработки. Проведённые расчёты показали, что при механической обработке станин больших габаритов (ВОВ 280–355 мм) возможно снижение трудоёмкости в 3–5 раз.

На рис.2 показана схема установки крупногабаритной станины для её полной механической обработки на станке с ЧПУ за один установ. Отличи-

[1] Прототипирование вентилятора выполнено инженером К.А. Астаховым

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

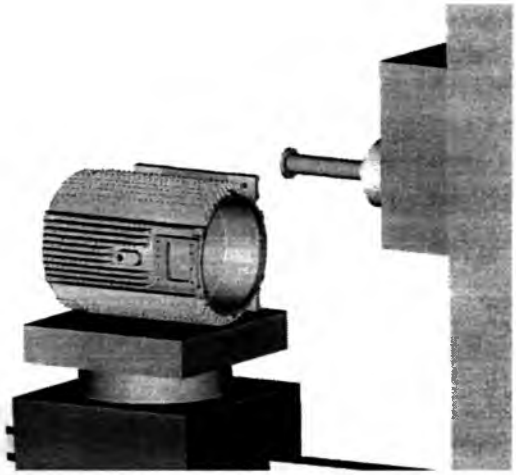


Рис.2. Установка станины габарита 355 мм на палете при комплексной обработке на четырёхкоординатном горизонтальном обрабатывающем центре с ЧПУ

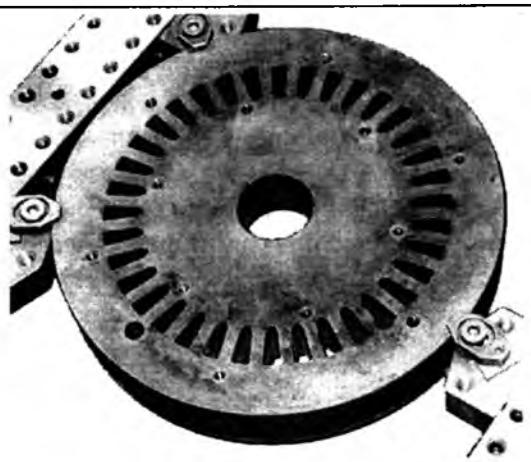


Рис.3. Готовая матрица штампа с 36 высокоточными фигурными отверстиями после электроэрозионной обработки

тельной особенностью такого способа является минимальное количество переустановок и возможность проводить обработку станин различных габаритов и вариантов исполнения на одном обрабатывающем центре без значительных переналадок. Верификация (проверка) полученных управляющих программ на твёрдотельной модели изделия позволяет значительно снизить вероятность ошибки при их применении на станках.

Успешным является также опыт применения системы Pro/ENGINEER при проектировании матриц вырубного штампа для изготовления статорных и роторных листов асинхронного электродвигателя. При получении электронного профиля пазовырубных отверстий матрицы использовалась такая возможность системы, как автоматический пересчёт контура паза с учётом нахождения каждого из размеров, определяющих форму паза, в середине своего поля допуска. Далее рассчитанный электронный профиль был загружен непосредственно в устройство ЧПУ современного японского электроэррозионного вырезного станка MITSUBISHI FA-20P, где была создана управляющая программа и выполнена высокоточная обработка формообразующих отверстий в матрице из закалённой стали Х12Ф1 твёрдостью HRCэ 61 – 63 (рис.3).

Таким образом, применение новой технологии проектирования и изготовления позволило сократить срок от идеи до готовой детали более чем в 4 раза и значительно повысить точность обработки, в том числе и за счёт отказа от бумажных носителей информации – чертежей. Понимание значительных преимуществ применения станков с ЧПУ привело к тому, что в настоящее время практически в 90% случаев выдачи заказа на изготовление оснастки обязательным требованием является наличие трёхмерной модели или управляющей программы.

Одним из важных вопросов при разработке новых электрических машин является дизайн. При определении основных элементов дизайна необходимо учитывать, что внешний вид электродвигателя должен быть не только узнаваемым и соответствовать современным тенденциям в этой области, но также быть технически целесообразным. При решении подобных задач необходимо проработать множество возможных решений, оценивая их как с эстетической, так и с технической точек зрения.

Описанные ранее возможности трёхмерного проектирования позволяют эффективно решать обе поставленные задачи. Использование программы Pro/ENGINEER позволяет иметь реальное представление о внешнем виде отдельных деталей и двигателя в целом ещё на этапе эскизного проектирования. Среди отличительных признаков представленного эскизного проекта электродвигателя 6А160 можно отметить:

– современный дизайн, соответствующий лучшим образцам зарубежных производителей;

– развитую наружную поверхность корпусных деталей;

– применение привёртных лап, позволяющих располагать вводное устройство двигателя с любой из трёх сторон.

Одновременно можно проанализировать возможные варианты конструкции, создавая различные ветви проекта. Оценивая влияние тех или иных конструктивных решений на дизайн, можно проводить, при необходимости, сравнительные расчёты на прочность, теплообмен, аэродинамику или вибрационную жёсткость.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Подобная работа была проведена при выборе дизайна подшипниковых щитов для двигателя ВОВ 160 мм. Одним из критериев при оценке эффективности применения внешнего оребрения являлась площадь наружной поверхности подшипникового щита, которую можно легко вычислить, используя стандартные средства получения информации о детали, реализованные в Pro/ENGINEER. Таким образом, был найден вариант конструкции щита, сочетающий современный дизайн и развитую наружную поверхность.

Всё больше российских и зарубежных фирм используют современные технологии для проведения своих разработок. Использование единой среды позволяет осуществить кооперацию конструкторских идей с коллегами или заказчиками.

Опыт совместного применения CAD/CAM/CAE-системы Pro/ENGINEER и PDM-системы Pro/INTRALINK подтвердил их эффективность при проектировании новых изделий. Конструкторские разработки, проведенные с помощью Pro/ENGINEER, позволили повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции за счёт более рационального и технически обоснованного дизайна, лучшей проработки конструкции изделий в целом и применения новых конструкторских решений, проверенных численным моделированием. Сегодня можно с уверенностью утверждать, что современные, качественные и конкурентоспособные изделия можно создавать только с использованием современных способов проектирования и инженерного анализа.

Эффективность использования фреймового представления знаний для организации интеллектуальных САПР электрических машин

КОБЕЛЕВ А.С.

При создании САПР ЭМ предложено интегрированные знания об электрической машине представлять системами фреймов, поскольку системы фреймов обладают иерархической структурой, возможностью наследования свойств и запуска требуемых процедур при выполнении определённых условий. При этом процесс автоматизированного проектирования ЭМ следует представить как автоматизированную активизацию соответствующих фреймов, содержащихся в базах знаний подсистем САПР, и согласование терминальных вершин фреймов с текущей ситуацией проектирования.

It is offered at development of electrical machine CAD systems the integratedknowledge of the electrical machine to represent with systems of frames. The expediency of such representation is based that systems of frames have a hierarchical structure, possibility of inheriting of properties, possibility of start of required procedures at execution of the defined conditions. Thus the process of EM computer-aided design should be presented as the atomized activation of the appropriate frames contained in knowledge bases of subsystems of a CAD, and the coordination of terminal tops of frames with a current situation of designing.

Первое десятилетие XXI в. должно ознаменоваться полномасштабным переходом от технологии документирования процесса проектирования электротехнических изделий, порождённого интеллектом конструктора, к технологии работы с интегрированными интеллектуальными САПР (ИСАПР), обладающими инженерными знаниями и активно ассистирующими человеку в создаваемом проекте.

Перед созданием ИСАПР ЭМ следует определиться с принципом построения системы, интегрирующей знания об электрической машине.

Создание единой "монолитной" централизованной модели ЭМ с жёсткими связями, имеющей глобальное видение общей задачи проектирования ЭМ, знания и ресурсы для её выполнения, т.е. содержащей жёстко связанные модели со всей совокупностью свойств и методов, при активизации любой процедуры вызовом, восходящим к головной программе, является нецелесообразным и, по-видимому, невозможным. Подобные способы организации модели удобны для описания одного или нескольких взаимосвязанных процессов, происходящих в ЭМ, но не для всей совокупности процессов. Неразрешимой трудностью является неудобство централизованного управления огромным количеством малосвязанных типовых элементов (причём посто-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

янно пополняющихся!), принадлежащих разным уровням декомпозиции ЭМ.

Говоря более обще, жёсткие модели не смогли обеспечить практическую реализацию структурно-параметрического синтеза АЭД. К настоящему времени программно проработан только параметрический синтез ЭМ.

Существенным является следующее замечание. Любая расчётная программа обслуживает конкретный **класс** ЭМ. Например, для расчётчика очевидно, какие экземпляры и какую гамму машин можно рассчитать с помощью программы "Электромагнитный расчёт низковольтных трёхфазных АЭД с КЗ ротором габарита 50–355 мм". Конструктор же работает с моделью только одного экземпляра ЭМ: в 2D-редакторе – с моделями единственного экземпляра сборки, узлов и деталей, не связанных друг с другом; в 3D-редакторе – со связной моделью экземпляра изделия. В дальнейшем конструктор может представить несколько подобных экземпляров в табличной форме, но технология работы от этого не меняется.

Аксиома 1. ***Полноценное интегрирование подсистем САПР можно осуществить тогда и только тогда, когда подсистемы работают с идентичными классами объектов.***

Поясним, что в наших работах понимается под терминами *"экземпляр изделия", "объект"* и *"класс".*

Определение 1. ***Экземпляром изделия называется конкретное изделие, реально существующее либо однозначно, во всех деталях, определяемое комплектом конструкторской документации.***

Определение 2. ***Объектом называется модель совокупности изделий (экземпляров), имеющих одни и те же свойства, функциональное назначение и правила поведения. Причём перечень свойств объекта определяется на основе абстрагирования, когда выделяются наиболее существенные свойства, содержащиеся в совокупности экземпляров, а вспомогательные аспекты опускаются.***

Определение 3. ***Классом называется совокупность объектов, обладающих общностью существенных свойств (схожестью структуры, состояния и поведения). Термины "экземпляр класса" и "объект" взаимозаменяемы*** [1].

Пример 1. *Экземпляр* асинхронного двигателя: АИРС100S4 УХЛ3, 220/280 В, 50 Гц, IM3081, IP44, IC0141, M4, К-3-II, FT165, полное обозначение которого фактически однозначно идентифицирует его как конкретное изделие. *Объектом* можно назвать множество экземпляров, подпадающих под базовое обозначение АЭД, в данном случае АИР10054. Объект более высокой иерархии – АИР100. В качестве класса можно выделить упомянутые "**низковольтные трёхфазные АЭД с КЗ ротором габарита 50–355 мм**". Названный класс будет *подклассом* для класса "**Асинхронная машина**".

Понятия "объект" и "класс" отличаются степенью абстрагирования. Понятия класса и объекта настолько тесно связаны, что невозможно говорить об объекте безотносительно к его классу. Различие между двумя понятиями заключается в том, что объект обозначает конкретную сущность, которая может иметь множество экземпляров, а класс определяет лишь абстракцию существенного в объекте. Например, лист ротора БИПМ.757212.002 представляет собой объект, экземпляры которого – листы ротора АЭД серии АИ, привязки "Р", габаритов 71–100, $2p = 2 \div 8$. В терминах классификатора ЕСКД названный объект относится к подгруппе *"роторы (якори), элементы роторов листовые" 757210,* группы *757200,* подкласса *757000,* класса *75.*

Таким образом, конструкторская подсистема САПР ЭМ должна, как и расчётная подсистема, содержать знания о модели целого класса ЭМ. Для приведённого примера – это конструкторские знания о классе низковольтных трехфазных АЭД с КЗ ротором габарита 50–355 мм. Можно провести следующую аналогию (однако, не полную) с расчётной подсистемой. Задавая входные данные в программу расчёта, мы получаем результаты вычислений с некоторой погрешностью по сравнению с данными опыта или точным расчётом. Конструкторская подсистема ИСАПР ЭМ должна обеспечить подобную технологию: ***задавая входные данные искомого изделия в конструкторскую программу (базу конструкторских знаний о проектируемом классе объектов + CAD), на выходе следует получать сгенерированный экземпляр КД проектируемой ЭМ.*** Погрешностью тут является несоответствие (недостаточность) между базовыми знаниями, заложенными в конструкторскую программу и знаниями, требуемыми для окончательного проектирования машины. Устранение "погрешности" осуществляется традиционной доработкой КД в графическом редакторе. (Неполнота аналогии заключается в том, что столь радикальный путь ликвидации погрешности для расчётной подсистемы отсутствует).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Определение 4. ***Формально-творческим конструкторским решением (далее – просто творческим решением) будем считать любое новое решение, не содержащееся на момент проектирования в базе знаний о конструкторской модели изделия (в базе знаний конструкторской подсистемы).*** Таким образом, справедливо следующее логическое выражение:

$$\mathbf{AllKn_i = BaseKn_i \vee CrKn_i;\ CrKn_i \equiv ErrKn_i}, (1)$$

где $\mathbf{AllKn_i}$ – множество конструкторских знаний об экземпляре (экземплярах) изделия, достаточных для его проектирования; $\mathbf{BaseKn_i}$ – множество знаний об экземпляре изделия, заложенное в конструкторскую САПР, $\mathbf{BaseKn_i \subset BaseKn}$; **BaseKn** – множество знаний о классе проектируемых изделий, заложенное в конструкторскую САПР; $\mathbf{CrKn_i}$ – множество творческих знаний об экземпляре изделия, которое равно погрешности $\mathbf{ErrKn_i}$ между знаниями специалиста, выполняющего проект, и соответствующими знаниями компьютерной базы.

Любое творческое конструкторское решение, перед тем, как воплотиться "на бумаге", формализуется в конкретные декларативные и процедурные знания о модели, наделённой геометрическими, физическими и экономическими свойствами. Таким образом, творческое решение – это плод интегрированных знаний, и для его описания желателен некий интегрирующий формализм (шаблон). Для описания конструкторской модели ЭМ воспользуемся чрезвычайно полезным понятием "фрейм", введённым М. Минским с целью разработки удобного способа представления знаний. ***Фрейм*** по Минскому – это структура данных для представления стереотипной (часто повторяющейся) ситуации [2]. Более полное определение фрейма:

Определение 5. ***Фрейм – это структура данных, содержащая имя и поименованные слоты, в которые заносятся их значения, предназначенная для представления прикладной модели и ассоциированная с процедурами заполнения слотов*** [3].

Слоты содержат знания о конкретной ситуации. Совокупность данных предметной области может быть представлена иерархической фреймовой системой, в которой, в частности, реализована возможность наследования свойств от верхних фреймов к нижним.

Любую параметризированную модель детали или узла ЭМ можно описать в виде сети фреймов (см. табл.1, 2). Таким образом, логической формуле (1) можно поставить в соответствие выражение:

$$\mathbf{FS_{AllKn} = FS_{BaseKn} \cup FS_{CrKn}\ FS_{CrKn} \equiv F_{ErrKn}}, \quad (2)$$

где $\mathbf{F_{SAllKn}}$, $\mathbf{FS_{BaseKn}}$, $\mathbf{FS_{CrKn}}$ – системы фреймов, содержащих соответствующие конструкторские знания об изделии.

В контексте программной реализации, каждая система фреймов $\mathbf{FS_i}$ состоит из множества собственно фреймов $\mathbf{F_i}$, конкретной структуры сети $\mathbf{Net_i}$ и совокупности правил наследования свойств $\mathbf{Inh_i}$:

$$\mathbf{FS_i = <F_i, Net_i, Inh_i>}\ . \quad (3)$$

Чтобы полнее пояснить продуктивность теории фреймов при проектировании ЭМ, обратимся к технологии процесса конструирования. Электрическая машина, как класс, обладает иерархической структурой. Для классов характерна иерархия ***"род–вид"***, ЭМ, как объект, содержащий ряд экземпляров, обладает иерархической структурой ***"целое –часть"*** [4]. При организации нисходящего конструирования, от сборки к узлам и далее к деталям, происходит наследование свойств типа: ***"высота оси вращения", "установочный размер по длине станины и сердечника статора", "исполнение по способу монтажа"*** и т.п. При организации восходящего проектирования от деталей к узлам передаются их геометрические свойства. Таким образом, проектировщик постоянно работает с понятиями иерархичности ***"род–вид", "целое–часть"*** и наследованием свойств. Процесс проектирования возможен только при наличии у проектировщика структурированных базовых знаний об изделии, о совокупности ранее существовавших технических решений, которые, в соответствии с техническим заданием, конструктор должен доработать и воплотить в новом изделии. Иными словами, зная о классе ЭМ "в целом", проектировщик должен уточнить новый экземпляр машины "в деталях". А вот что пишет о фреймовой теории М. Минский: "Отправным моментом для данной теории служит тот факт, что человек, пытаясь познать новую для себя ситуацию, ...выбирает из своей памяти некоторую структуру данных (образ), называемую нами фреймом, с таким расчётом, чтобы путем изменения в ней отдельных деталей сделать ее пригодной для понимания более широкого класса явлений или процессов. ..."Верхние уровни" фрейма четко определены, поскольку образованы такими понятиями, которые всегда справедливы по отношению к предполагаемой ситуации. На более низких уровнях имеется много

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

особых ... "ячеек", которые должны быть заполнены характерными примерами или данными. ... Слоты фрейма в обычном своём состоянии заполнены так называемыми заданиями отсутствия или заранее заготовленными значениями, т.е. сведениями о деталях (частностях), которые не обязательно должны присутствовать в какой-либо конкретной ситуации. Связь заданий отсутствия со своими терминалами не является жёсткой и неизменной, поэтому они легко могут быть заменены другими сведениями, более подходящими к текущей ситуации. Задания отсутствия могут, таким образом, выполнять роль переменных..." [2]. "Графически фрейм можно изобразить в виде сети, состоящей из узлов и связей между ними. Каждый узел представляет собой определённое понятие, которое – и в этом заключается основной смысл теории – может быть, а может и не быть задано в явном виде. В последнем случае оно может быть конкретизировано в результате процесса согласования данного фрейма с некоторой конкретной ситуацией, имеющей место во внешнем мире. Незаданные в явном виде узлы называются терминалами. Они образуют нижние уровни графовой структуры, тогда как на верхних уровнях располагаются понятия, которые всегда справедливы в отношении представляемой данным фреймом ситуации. Таким образом, совокупность заданных в явном виде узлов – понятий образует основу для "понимания" любой конкретной ситуации из определенного для данного фрейма класса ситуаций. "Понимание" происходит путем конкретизации терминалов и согласования возможных для каждого из них понятий с вполне определённой, существующей во внешнем мире обстановкой. Центральным моментом является использование одних и тех же терминалов различными фреймами, что позволяет координировать информацию, собираемую из разных источников. Группы связанных между собой фреймов объединяются в системы..." [5]. Из цитируемого материала и анализа процесса проектирования ЭМ следует важный **вывод,** который мы используем при построении интегрированной модели АЭД:

Если упорядоченные и структурированные знания о классе проектируемых электрических машин описать системой фреймов, то процесс проектирования ЭМ вообще можно представить как пошаговую или параллельную активизацию в памяти соответствующих фреймов и согласование их терминальных вершин с текущей ситуацией проектирования. Текущая ситуация формируется, во-первых, техническим заданием на проектирование, во-вторых, текущими технико-экономическими параметрами и характеристиками проектируемого объекта в фиксированный этап (шаг) проектирования. Процесс ***автоматизированного проектирования*** можно представить как активизацию требуемых фреймов в базах знаний соответствующих подсистем САПР. Терминалы фрейма заполняются из БД с помощью указателей (маркеров, ключей). Такими указателями являются: требования технического задания; затем требования технических условий; далее, требования, инициируемые самой интеллектуальной САПР; наконец, творческие требования конструктора. В случае неудачи из БЗ и БД с помощью сети поиска информации, объединяющей системы фреймов, должен выбираться другой фрейм, терминалы которого окажутся между собой в более подходящих отношениях применительно к той же рассматриваемой ситуации проектирования. Структура объекта проектирования описывается *фреймом-структурой,* пример которого показан в табл.1, 2. Поз. *1* в табл.1 определяет объект – АИР100S4, в который входит щит. Поз. *2* указывает на подкласс щита. Поз. *3* и *7* указывают на вызов фреймом внешних процедур. Поз. *4*, *5* информируют о взаимодействии фрейма с подфреймами (фреймами нижней иерархии). Поз. *6* иллюстрирует получение знаний из диалога с пользователем. Поз. *7–9* – пример тех "конкретных уточнений", которые проясняются в процессе проектирования.

Готовый проект будет определяться системой отобранных фреймов со слотами, заполненными конкретными значениями, удовлетворяющими ТЗ на проектирование.

Подчеркнём, что система фреймов несет не только конструкторские знания, но связывает воедино различные модели АЭД (см. примеры 2, 3).

Пример 2. Фрейм "**электромагнитная система АЭД**", имеет слоты **КПД**, **cosφ**) и т.п., которые активизируются только после вызова программы электромагнитного расчёта.

Пример 3. Заполнение части слотов фрейма "**Станина**", определяющих размеры оребрения, может быть разрешено только после вызова программы тепло-вентиляционного расчёта; заполнение части слотов фрейма "**Вал**" может быть разрешено только после вызова программы механических расчётов валов на жёсткость и прочность.

Последовательность проектирования может быть описана совокупностью *фреймов-сценариев*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 1

Пример фрейма *"Щит подшипниковый"*

№	Имя слота	Значение слота	Способ получения знания	Указатель наследуемости атрибутов
1	Тип АЭД	АИР100S4	Наследование свойств	Наследуется от фрейма верхнего уровня (*Сборочный чертёж*)
2	Тип щита	Фланцевый	Наследование свойств	Наследуется от фрейма верхнего уровня (*Сборочный чертёж*)
3	Графическое отображение щита	DRW_SHIELD	Процедура	–
4	Ступица	*Ступица_100*	Фрейм	–
5	Обод	*Обод_100*	Фрейм	–
6	Выемка на ступице	Есть/Нет	Из диалога с пользователем	Наследуется фреймом нижнего уровня (*Ступица*)
7	Тепловая проводимость от щита к наружному воздуху	1,26 Вт/°С	Метод: "Тепловентиляционный расчёт АЭД"	–
8	Масса	1,76 кг	Формула	–
9	Обозначение	ВАКИ.7 12242.0 10	Из базы данных	–
	...	...	...	...

Таблица 2

Пример фрейма (иодфрейма) *"Обод"* (элемент *"Щита подшипникового"*)

№	Имя слота	Значение слота	Способ получения знания	Указатель наследуемости атрибутов
1	Тип фланца	FF215	Наследование свойств	Наследуется от фрейма верхнего уровня (*Щит подшипниковый*)
2	Графическое отображение обода	DRW_Obod	Процедура	–
3	Вид стенки	Наклонная	Из диалога с пользователем	Передается от фрейма равной иерархии (*Стенка*)
4	Обод фланцевый	*Обод фланцевый_100*	Фрейм	–
5	Диаметр замка обода внутренний	178	Из базы данных	Передается во фрейм верхнего уровня (*Щит подшипниковый*)
	...	...	...	

(рисунок), состоящих из "сцен" и "действий". Действия могут быть сложными, т.е. представлять сцены нижней иерархии. Так, на рисунке показана дальнейшая декомпозиция действия 1.3 сцены 1 – "Контролировать значения $M_{пуск}$ и максимального момента $M_{макс}$". Данный сценарий весьма напоминает словесное описание процедурного алгоритма. Однако в отличие от жёсткого алгоритма в сценарии действия могут развиваться по обстоятельствам, определяемым вышеназванными указателями; фреймы-сценарии могут использовать терминалы других фреймов; количество сцен и действий может безболезненно для программы наращиваться. В сценарии могут *быть*: ***отклонения,*** когда сценарий прерывается действием другого сценария; ***препятствия,*** когда отсутствуют условия для выполнения действия; ***ошибки,*** когда действие оканчивается нештатным образом. Отклонением от сценария может быть решение перейти на АЭД большего габарита. Препятствием для действия *ab* может быть запрет на использование материала с задаваемым ρ_{Al_i} из-за его высокой стоимости; ошибкой – отсутствие материала в БД.

Заключение. С учётом универсальности теории фреймов, позволяющих отобразить всё многообразие знаний о предметной области, при создании

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Сценарий: Расчёт пускового момента 3ф АЭД с КЗ ротором.		
Цель: ***Получить повышенный, по сравнению с общепромышленными требованиями (ОП), пусковой момент*** $M_{пуск}$		
Сцена 1: Расчёт при варьировании сопротивлением материала заливки ротора.		
1.1. Увеличить удельное сопротивление материала заливки ротора ρ_{Al} на $\Delta\rho_{Al}$.		
1.2. Выполнить расчёт.		
1.3. Контролировать значения $M_{пуск}$ и максимального момента M_{max}:		
а) Если $M_{пуск}$ не достиг искомого значения и $M_{max} \geq M_{maxоп}$, увеличить текущее сопротивление ρ_{Al_i} на:		
$\Delta\rho_{Al}$	$0{,}5\Delta\rho_{Al}$	var $\Delta\rho_{Al}$
б) Выполнить расчёт.		
в) Если $M_{пуск}$ не достиг искомого значения и $M_{max} < M_{maxоп}$, перейти к сцене:		
№ 2	№ 3	№ 4
Сцена 2: Расчёт при варьировании размерами КЗ кольца.		
2.1. Уменьшить сечение КЗ кольца.		
2.2. Выполнить расчёт.		
2.3. Контролировать значение $M_{пуск}$ и технологически минимально допустимые размеры КЗ кольца.		
Сцена 3: Расчёт при варьировании сечением паза ротора.		
3.1. Уменьшить сечение паза ротора.		
3.2. Выполнить расчёт.		
3.3. Контролировать значение $M_{пуск}$ и технологически минимально допустимые размеры паза ротора.		
Сцена 4: Расчёт при варьировании витками обмотки статора.		
4.1. Уменьшить число витков в пазу статора.		
4.2. Выполнить расчёт.		
4.3. Контролировать $M_{пуск}$ и I_{μ}.		

Фрагмент фрейма-сценария "Расчёт пускового момента 3ф АЭД с короткозамкнутым ротором (КЗ)"

ИСАПР АЭД в качестве **первичного принципа** построения системы, интегрирующей знания об электрической машине, целесообразно **представлять знания об ЭМ фреймовой моделью.**

Эффективным **способом реализации** фреймовой модели, при практическом воплощении интегрированных знаний об электрической машине в программы САПР, является **агентно-орнентированное программирование [6].**

Список литературы:

1. **Евгенев Г.Б., Кобелев К.С.** Объектно-ориентированные анализ и проектирование в машиностроении // Информационные технологии. 2003. № 7. С. 2 – 7.

2. **Минский М.** Фреймы для представления знаний. М.: Энергия, 1979.

3. **Евгенев Г.Б.** Системология инженерных знаний: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.

4. **Кобелев А.С.** Автоматизированное проектирование низковольтных асинхронных двигателей с использованием интегрированных моделей электрических машин // Электричество. 2004. № 2. С.31–38.

5. **Кулаков Ф.М.** Приложение к русскому изданию кн. М. Минского "Фреймы для представления знаний". М.: Энергия, 1979.

6. **Кобелев А.С.** Агентно-ориентированное программирование как реализация фреймового представления знаний об электрической машине в интеллектуальных САПР // Электротехника. 2005. № 5. С. 8–14.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Выбор числа пазов двигателей привода лифтов

АФОНИН В.И.

Описаны результаты работы по выбору чисел пазов статора и ротора двухскоростных двигателей для привода лифтов. Приведены рекомендации по выбору чисел пазов ротора расчётно-экспериментальным путём. Результаты использованы при создании двигателей привода лифтов серии 5А.

There is a description of slots number selection work results for stator and rotor of elevator drive motors. There are recommendations for slots number selection of rotor by design-experiment way. The results are used during creation of motors for elevation drive, series 5.

Двигатели главного привода являются основными источниками шума при работе лифтовых лебедок, которые устанавливаются в машинных помещениях зданий различного назначения. Поскольку большинство лифтов устанавливают в жилых зданиях, необходимо добиваться снижения шума до допустимых значений. В первую очередь это относится к шумам магнитного происхождения в слышимом диапазоне частот.

Выбор благоприятного числа пазов статора (z_1) и ротора (z_2) очень важен для снижения магнитного шума двигателей привода лифтов. При этом следует иметь ввиду, что от выбора соотношений чисел пазов статора и ротора зависит не только малошумность двигателей, но и их моментные характеристики в двигательных и тормозных режимах. Необходимо учитывать наличие двух скоростей с соотношением от 3:1 до 6:1. Практика показывает, что ни одно из сочетаний z_1/z_2 не обеспечивает положительные результаты по всем показателям одновременно.

Число пазов статора. Число пазов статора z_1 выбирается таким образом, чтобы число пазов на полюс и фазу обмотки малой скорости было $q \geq 1$, так как при $q < 1$ возрастает число гармонических составляющих магнитного поля, т.е. возбуждающих факторов увеличения магнитного шума, усложняется схема обмотки и технология обмоточных работ.

Приняв $q_м = 1$, получим из $z_1 = 2mp_м q_м$:

$p_б/p_м$	2/8	2/12	3/9	3/12	3/18
z_1	48	72	54	72	108

Поскольку число пазов статора выбрано и остаётся неизменным, то перечисленные факторы необходимо учесть при подборе числа пазов ротора.

Число пазов ротора. Рассмотрим основные условия, которыми необходимо руководствоваться при выборе чисел пазов ротора, имея ввиду, что число пазов статора уже выбрано.

Для уменьшения значения асинхронных моментов, вызванных зубцовыми гармониками проводимости воздушного зазора, гармониками МДС обмоток статора и ротора, добавочными потерями, а также с учётом условий работы рекомендуется соблюдать условия:

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}75z_1 \leq z_2 \leq 1{,}25z_1; \\ \text{при тяжёлых условиях пуска } z_2 < z_1. \end{array}\right\} \quad (1)$$

В процессе работы лифтового привода происходит переключение питания с обмотки большой скорости ($p_б$) на обмотку малой скорости ($p_м$). При этом магнитное поле статора, возбуждённое обмоткой $p_б$, затухает и гармоники затухающего поля вместе с гармониками магнитного поля, возбуждённого обмоткой статора с числом пар полюсов $p_м$, могут вызывать шум, напоминающий свист. Для их подавления необходимо [1] выполнение условия:

$$|z_1 - z_2| \neq (p_б + p_м) \pm r, \quad (2)$$

где r может принимать значения от 0 до 3.

Т.е. для

$p_б/p_м = 2/8$ $\quad |z_1 - z_2| \neq 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13;$

$p_б/p_м = 2/12$ $\quad |z_1 - z_2| \neq 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17;$

$p_б/p_м = 3/9$ $\quad |z_1 - z_2| \neq 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15;$

$p_б/p_м = 3/12$ $\quad |z_1 - z_2| \neq 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18;$

$p_б/p_м = 3/18$ $\quad |z_1 - z_2| \neq 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24.$

Тогда для выбранных значений z_1 имеем нерекомендованные значения z_2 (табл.1).

При проектировании двухскоростных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором для привода лифтов рациональное соотношение чисел пазов статора и ротора следует выбирать с учётом табл.1.

На рис.1 построена диаграмма для предварительного выбора z_2 при $z_1 = 48 \div 108$ по участкам:

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 1

$p_б/p_м$	z_1	$0{,}75z_1 \le z_2 \le 1{,}25z_1$	Нерекомендованные z_2
2/8	48	36–60	35, 37, 38, 39, 40, 41, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61
2/12	72	54–90	55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89
3/9	54	40–68	39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69
3/12	72	54–90	54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90
3/18	108	81–135	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132

верхним – для $z_2 > z_1$ с ограничением сверху линией $z_2 = 1{,}25z_1$ и снизу линией $z_2 = z_1 + (p_б + p_м)$; нижним – для $z_2 < z_1$ с ограничением снизу линией $z_2 = 0{,}75z_1$ и сверху линией $z_2 = z_1 - (p_б + p_м)$. Точками на рис.1 отмечены значения z_2, с которыми проводились испытания двигателей.

Далее анализировались взаимодействия гармонических полей статора и ротора, создаваемых ими добавочных синхронных моментов и радиальных вибрационных сил [2, 3], которые ограничиваются введением скоса и укорочением шага обмотки. Результаты анализа сведены в табл.2–5.

Зубцовые гармоники статора и ротора первого порядка – ν_{z1} и μ_{z1}, второго – ν_{z2} и μ_{z2}. Незубцовые гармоники обозначены ν, синхронные моменты в двигательном режиме обозначены СД, при неподвижном роторе – СО, вибрационные моменты – В, порядок колебания пакета статора под действием двух гармоник – r = 0, 1, 2, 3, 4. Синхронные моменты при вращающемся роторе и колебания четвёртого порядка существенно ослабляются введением скоса и увеличением воздушного зазора.

Добавочные синхронные моменты, пульсиру-

Таблица 2

40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	Гармоники		r
														$p=3$																	
								СД						СО						СД									ν_{z1}	μ_{z1}	
		СД												СО															ν_{z2}	μ_{z2}	
														СО											СД				ν	μ_{z1}	
							В		В				В		В				В		В								ν_{z1}	μ_{z1}	
								0						0						0									ν_{z1}	μ_{z1}	0
							1		1				1		1				1		1								ν_{z1}	μ_{z1}	1
						2				2		2				2		2				2							ν_{z1}	μ_{z1}	2
					3						3						3						3						ν_{z1}	μ_{z1}	3
				4						4		4				4		4						4					ν_{z1}	μ_{z1}	4
														$p=9$																	
														СО															ν_{z1}	μ_{z1}	
														СО															ν_{z2}	μ_{z2}	
														СО															ν	μ_{z1}	
													В		В														ν_{z1}	μ_{z1}	
														0															ν_{z1}	μ_{z1}	0
													1		1														ν_{z1}	μ_{z1}	1
												2				2													ν_{z1}	μ_{z1}	2
											3						3												ν_{z1}	μ_{z1}	3
4										4								4										4	ν_{z1}	μ_{z1}	4
Рекомендуемые числа пазов ротора																															
	41	42	43																						65	66	67				

Таблица 3

36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	Гармоники		r
												$p=2$															
СО				СД				СД				СО				СД								СО	ν_{z1}	μ_{z1}	
		СД										СО													ν_{z2}	μ_{z2}	
СО												СО												СО	ν	μ_{z1}	
							В		В		В		В		В		В								ν_{z1}	μ_{z1}	
												0													ν_{z1}	μ_{z1}	0
							1		1		1		1		1		1								ν_{z1}	μ_{z1}	1
						2		2		2				2				2							ν_{z1}	μ_{z1}	2
					3				3		3		3		3					3					ν_{z1}	μ_{z1}	3
				4				4				4				4					4				ν_{z1}	μ_{z1}	4
												$p=8$															
												СО													ν_{z1}	μ_{z1}	
												СО													ν_{z2}	μ_{z2}	
												СО													ν	μ_{z1}	
											В		В													ν_{z1}	μ_{z1}	
												0													ν_{z1}	μ_{z1}	0
											1		1												ν_{z1}	μ_{z1}	1
										2				2											ν_{z1}	μ_{z1}	2
									3						3										ν_{z1}	μ_{z1}	3
4								4								4								4	ν_{z1}	μ_{z1}	4
Рекомендуемые числа пазов ротора																											
	37	38	39																		57	58	59				

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 4

54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
p = 2																																				
		СД								СД				СД				СО				СД				СД							СД			
																		СО																		
																		СО																		
													В		В		В		В		В		В		В											
														0				0				0													
													1		1		1		1		1		1												
												2				2				2				2											
											3				3		3		3		3				3										
										4				4				4				4				4									
p = 12																																				
																		СО																		
																		СО																		
																		СО																		
																	В		В																	
																	0																			
																	1		1																	
																2				2																
															3						3															
														4								4														
Рекомендуемые числа пазов ротора																																				
54	55		57	58	59	60	61	62	63																		81	82	83	84	85	86		88	88	90

Гармоники		r
ν_{z1}	μ_{z1}	
ν_{z2}	μ_{z2}	
ν	μ_{z1}	
ν_{z1}	μ_{z1}	
ν_{z1}	μ_{z1}	0
ν_{z1}	μ_{z1}	1
ν_{z1}	μ_{z1}	2
ν_{z1}	μ_{z1}	3
ν_{z1}	μ_{z1}	4
ν_{z1}	μ_{z1}	
ν_{z2}	μ_{z2}	
ν	μ_{z1}	
ν_{z1}	μ_{z1}	
ν_{z1}	μ_{z1}	0
ν_{z1}	μ_{z1}	1
ν_{z1}	μ_{z1}	2
ν_{z1}	μ_{z1}	3
ν_{z1}	μ_{z1}	4

Таблица 5

54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
p = 3																																				
												СД						СО						СД												
																		СО																		
СО						СД												СО												СД						СО
											В		В				В		В					В		В										
												0						0						0												
											1		1				1		1				1		1											
										2				2		2				2		2				2										
									3						3						3						3									
								4						4		4				4		4						4								
p = 12																																				
																		СО																		
																		СО																		
																		СО																		
																	В		В																	
																	0																			
																	1		1																	
																2				2																
															3						3															
														4								4														
Рекомендуемые числа пазов ротора																																				
	55	56	57	58	59		61																						83		85	86	87	88	89	

Гармоники		r
ν_{z1}	μ_{z1}	
ν_{z2}	μ_{z2}	
ν	μ_{z1}	
ν_{z1}	μ_{z1}	
ν_{z1}	μ_{z1}	0
ν_{z1}	μ_{z1}	1
ν_{z1}	μ_{z1}	2
ν_{z1}	μ_{z1}	3
ν_{z1}	μ_{z1}	4
ν_{z1}	μ_{z1}	
ν_{z2}	μ_{z2}	
ν	μ_{z1}	
ν_{z1}	μ_{z1}	
ν_{z1}	μ_{z1}	0
ν_{z1}	μ_{z1}	1
ν_{z1}	μ_{z1}	2
ν_{z1}	μ_{z1}	3
ν_{z1}	μ_{z1}	4

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ющие во времени и вызывающие вибрации и магнитные шумы, создаются парой высших (зубцовых) гармонических статора ν и ротора μ с одинаковым числом полюсов при данной частоте вращения. Выбирая z_2, следует исключать значения, при которых возможны сильные синхронные моменты.

Способ выбора числа пазов ротора, представленный в табл.2–5, позволяет проводить анализ для обеих частот вращения (большей и меньшей) и таким образом выявлять рациональные числа пазов для каждого из соотношений пар полюсов.

Чтобы избежать самых опасных для возникновения шума силовых волн низких порядков r (r = 0, 1, 2, 3, 4) рекомендуется соблюдать следующие условия [2, 3]:

а) $r = 0$ $\quad z_1 - z_2 \neq [0; 2p]$;
б) $r = 1$ $\quad z_1 - z_2 \neq [\pm 1; \pm 2p \pm 1]$;
в) $r = 2$ $\quad z_1 - z_2 \neq [\pm 2; \pm 2p \pm 2]$;
г) $r = 3$ $\quad z_1 - z_2 \neq [\pm 3; \pm 2p \pm 3]$;
д) $r = 4$ $\quad z_1 - z_2 \neq [\pm 4; \pm 2p \pm 4]$.

На примерах покажем, как определять нежелательные числа пазов ротора малошумных двигателей привода лифтов.

Пример 1. Необходимо отобрать нерекомендуемые числа пазов ротора двигателя с числом пар полюсов p = 2/12, имеющего 72 паза на статоре.

Решение. Учитывая условие (1) ограничим количество пазов ротора числами 54–90.

Чтобы первые пазовые гармоники не вызывали вибрации с числом волн r = 0÷4, следует из указанных чисел для r = 0 исключить 68, 72; для r = 1 – 61, 69, 71, 73, 75, 77; для r = 2 – 66, 78; для r = 3 – 65, 69, 71, 73, 75, 79; для r = 4 – 64, 68, 76, 80.

Пример 2. Необходимо отобрать нерекомендуемые числа пазов ротора двигателя с числом пар полюсов p = = 3/12, имеющего 72 паза на статоре.

Решение. Учитывая условие (1) ограничим количество пазов ротора числами 54–90.

Чтобы первые пазовые гармоники не вызывали вибрации с числом волн r = 0÷4, следует из указанных чисел для r = 0 исключить 66, 72; для r = 1 – 65, 67, 71, 73, 77, 79; для r = 2 – 64, 68, 70, 74, 76, 80; для r = 3 – 63, 69, 75, 81; для r = 4 – 62, 63, 70, 74, 76, 82.

Создавая двигатели приводов лифтов с соотношением частот вращения 1500/250 1/мин (p = 2/12) и 1000/250 1/мин (p = 3/12) в габаритах 180, 200 и 225 мм в целях унификации конструкции магнитопроводов и технологии производства решено было проектировать их в одной радиальной геометрии для каждого габарита. При этом число пазов ротора принято одинаковым.

Сопоставляя данные, полученные в примерах 1 и 2 (предпочтительны z_2 = 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90) с рекомендациями (1), (2) и табл. 1, 4, 5 сталкиваемся с некоторыми противоречиями.

Приведённый пример указывает на то, что для выбора чисел пазов ротора двухскоростных двигателей привода лифтов существующих в литературе рекомендаций недостаточно, необходим тщательный расчётный и экспериментальный анализ, учитывающий вибрационные свойства статора как колебательной системы.

Для двигателей габарита 200 мм с соотношением пар полюсов 3/12 и 2/12 были рассчитаны уровни виброскорости [4] для чисел пазов ротора (табл.6) как рекомендованных (табл. 4 и 5, примеры 1 и 2), так и нерекомендованных (табл.1).

Выделим те числа пазов ротора, при которых значения виброскорости наименьшие: z_2 = 54, 56, 57, 60 для p = 3/12 и z_2 = 54, 56, 57 для p = 2/12.

Для этих двигателей были изготовлены роторы с числом пазов 54, 56, 57, 60, 62.

Испытания проводились в заглушенной камере. В качестве параметров. описывающих шумовые характеристики двигателей, наиболее удобный – средний уровень звука. При этом используется не менее пяти измерительных точек (напротив оси вала, со стороны противоположной

Таблица 6

Режим работы	Значения виброскорости, дБ, при числе пазов статора 72 и числе пазов ротора					
	54	56	57	58	60	62
Двигатель 7,5 кВт, p = 3/12, D_a = 327 мм, S = 0,7 мм, скос 1,0 з.д.с						
Пуск на большой скорости	92	85,5	94,5	100,5	48,5	79
Работа на большой скорости	50	48,5	67,5	49,5	55,5	74,5
Торможение на малой скорости	89	63	49,5	93	73,5	115
Работа на малой скорости	60	38	38	59	49	61
Двигатель 12 кВт, p = 2/12, D_a = 327 мм, S = 0,7 мм, скос 1,0 з.д.с						
Пуск на большой скорости	89	83	89	91	90	84
Работа на большой скорости	44	51	57	45,5	55	56,5
Торможение на малой скорости	96	95,5	61	131	101	100
Работа на малой скорости	50	44,5	48	61,5	61,5	63,5

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 7

Частота, Гц	Уровень звукового давления при числе пазов z_2												
	42	48	51	52	54	56	57	59	60	62	63	64	66
Синхронная частота вращения 1000 / 250, 1/мин													
125 (p = 12)	55/45	43/36	42/48	48/40	33/24	36/30	42/38	37/37	36/25	35/32			36/27
250 (p = 12)	65/49	50/49	64/46	73/62	63/34	59/50	53/42	59/39	66/40	51/43			66/38
500 (p = 3)	63/45	57/49	59/52	58/60	53/53	54/54	56/56	56/56	52/52	57/56			59/59
1000 (p = 3)	68/41	59/48	62/40	61/43	50/51	57/57	56/56	60/60	59/59	68/66			61/61
Синхронная частота вращения 1500 / 250, 1/мин													
125 (p = 12)						39/33	65/64	43/31	37/37	35/34	36/28	40/28	
250 (p = 12)						64/43	60/50	65/42	62/37	58/39	56/38	60/30	
1000 (p = 2)						58/58	66/64	65/64	81/60	65/64	56/57	57/57	
2000 (p = 2)						50/50	64/57	63/55	78/55	58/51	53/48	53/47	

рабочему концу вала, сверху и с обеих сторон) на расстоянии 1 м от поверхности двигателя. Измерение проводились в условиях свободного звукового поля в активной зоне частот.

Анализ проводился в октавах 500 и 1000 Гц (p = 3), 1000 и 2000 Гц (p = 2), 125 и 250 Гц (p = 12). Результаты приведены в табл.7, где в числителе указаны значения при напряжении 380 В, в знаменателе – 190 В.

Из рассмотрения полученных результатов видно, что при изменении чисел пазов на роторе меняется и значение магнитной составляющей по уровню звукового давления. Магнитная составляющая при неблагоприятном соотношении чисел пазов статора (z_1) и ротора (z_2) определяет общий уровень шума.

Аналогичная работа была выполнена при выборе пазов ротора двигателей с соотношением пар полюсов p = 2/8 и p = 3/9 [5].

В результате проделанного комплекса расчётно-экспериментальных исследований для двухскоростных двигателей привода лифтов могут быть рекомендованы следующие числа пазов ротора: z_2 = 42 (p = 3/9), z_2 = 58 и 59 (p = 2/8), z_2 = 54 и 57 (p = 3/12 и p = 2/12).

Список литературы

1. **Лазароиу Д.Ф., Бикер Н.** Шум электрических машин и трансформаторов. М.: Энергия, 1973.

2. **Шубов Н.Г.** Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергия, 1979.

3. **Исаков В.М., Федорович М.А.** Виброшумозащита в электромашиностроении. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.

4. **Астахов Н.В., Малышев В.С., Медведев В.Т., Полухин В.Ф.** Расчёт магнитных вибраций асинхронных двигателей. М.: МЭИ, 1985.

5. **Афонин В.И.** Малошумные двигатели для пассажирских лифтов. Особенности проектирования // Привод и управление. 2002. № 1. С. 22–25.

Виброшумоактивность двигателей привода лифтов

АФОНИН В.И.

Рассмотрены источники виброшумоактивности двигателей привода лифтов. Рассчитаны частоты собственных колебаний статоров лифтовых двигателей. Приведены экспериментальные данные. Результаты работ используются при разработках и модернизациях лифтовых двигателей.

Origins of vibronoiseactivity of motors for elevators driving was considered. Stator natural vibrations frequencies of motors for elevators driving was calculated. Experimental data were cited. Research results are used under development and modernization of motors for elevators driving.

Причинами магнитных шумов и вибраций в асинхронных двигателях являются изгибные колебания корпуса двигателя под действием временны́х и пространственных изменений магнитных сил тяжения, действующих между статором и ротором. Практика показывает, что магнитные вибрации в двигателях редко являются определяющими и ими можно пренебречь. Иначе дело обстоит с магнитным шумом. Он имеет тональный характер, очень неприятен и часто возникает в многополюсных машинах. В лифтовых двигателях это имеет место на обмотках малой ско-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

рости. Магнитные шумы в подавляющем большинстве случаев вызываются радиальными силами. Они появляются при взаимодействии гармоник поля статора и ротора, числа пар полюсов которых отличаются на небольшую величину. Радиальная сила пропорциональна произведению амплитуд гармоник [1]:

$$F \equiv B_\nu B_\mu. \qquad (1)$$

Если гармоника статора имеет число пар полюсов

$$\nu = (6k_1 + 1)p, \qquad (2)$$

а гармоника ротора имеет число пар полюсов

$$\mu = k_2 Z_2 + \nu, \qquad (3)$$

то порядок радиальной силовой волны

$$r = \nu \pm \mu. \qquad (4)$$

В формулах (2) и (3) $k_1 = \pm1, \pm2, \ldots$, $k_2 = \pm1, \pm2, \ldots$ – последовательный ряд положительных и отрицательных чисел, определяющих порядок гармоники; Z_2 – число пазов ротора.

Радиальные силовые волны вращаются относительно статора с частотой [2]

$$f_r = f[(k_2 Z_2/p)(1-s) \pm 2], \qquad (5)$$

если силовые волны возникают в результате сложения гармоник ($r = \nu + \mu$), и

$$f_r = f(k_2 Z_2/p)(1-s), \qquad (6)$$

если силовые волны возникают в результате вычитания гармоник ($r = \nu - \mu$).

В формулах (2)–(6): ν, μ, k_1, k_2 – алгебраические числа, они могут быть как положительными, так и отрицательными; f – частота питания; s – скольжение, о.е.

Вибрации статоров, возбуждаемые магнитными силами, образуют пространственные формы колебаний (рис.1).

При $r = 0$ (рис.1,*а*) радиальные усилия не зависят от пространственной координаты, но периодически изменяются во времени с частотой f_r.

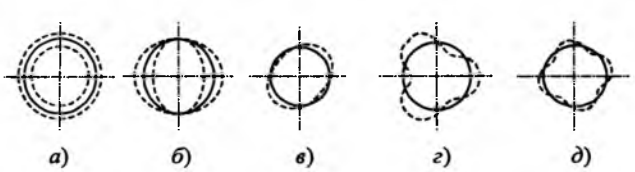


Рис.1. Виды колебаний статоров электродвигателей: *а* – $r = 0$; *б* – $r = 1$; *в* – $r = 2$; *г* – $r = 3$; *д* – $r = 4$

В этом случае статор подобен цилиндрическому сосуду с изменяющимся во времени давлением. Такие колебания возникают при сложении двух гармоник поля с одинаковой длиной волны, но с разными скоростями. При этом частота собственных колебаний кольца статора [1]

$$\omega_0 = \sqrt{Eh/mR_c^2}. \qquad (7)$$

При $r = 1$ (рис.1,*б*) имеет место одностороннее притяжение, действующее на ротор и при резонансе вызывающее сильную вибрацию. Часто этот вид приводит к возникновению вибрационных моментов.

Статор с обмоткой запрессовывается в корпус двигателя на аксиально расположенные рёбра, количество которых колеблется от 4 до 8. При этом его можно рассматривать как часть кольца с углом α (рис.2), частота собственных колебаний которого [1]

$$\omega_0 = f(\alpha)\sqrt{Eh^3/12mR_c^4}. \qquad (8)$$

При $r = 2, 3, 4 \ldots$ возникают радиальные усилия, приложенные равномерно по окружности статора в r точках и приводящие к изгибу кольца статора (рис.1,*в*).

Этот вид колебаний наиболее часто встречается в практике. Для расчёта частоты собственных колебаний ярма статора И.Г. Шубов предлагает формулу

$$\omega_0 = (r(r^2-1)/\sqrt{r^2+1})\sqrt{Eh^3/12mR_c^2}. \qquad (9)$$

В формулах (7)–(9) m – масса, приходящаяся на 1 см^2 средней цилиндрической поверхности ярма (зубцовая зона с обмоткой считается присоединённой массой), кг·с^2/см^2; h – высота спинки статора, см; R_c – средний радиус ярма, см; $E = 2{,}1 \cdot 10^6$ кг·с/см^2 – модуль упругости.

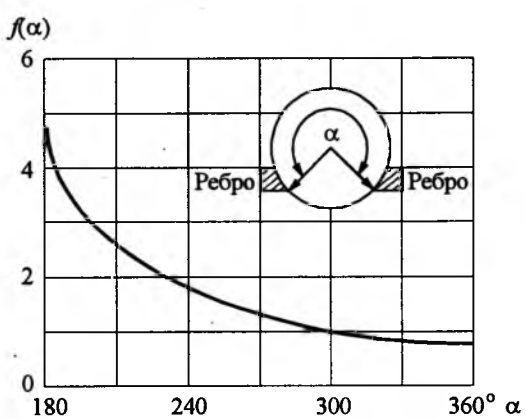


Рис.2. К расчёту колебаний статора

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

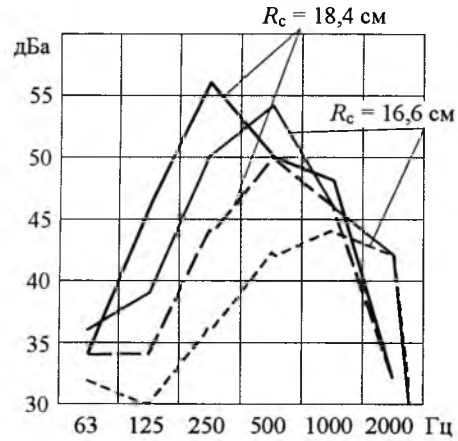


Рис.3. Спектр шума двигателей привода лифтов габарита 225 мм:
—— – U = 380 В; ---- – U = 190 В

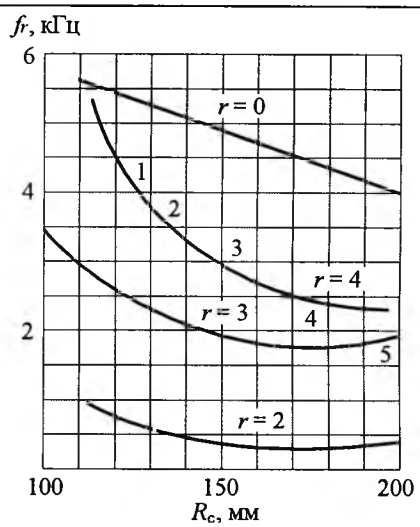


Рис.4. Частота собственных колебаний статоров двигателей привода лифтов серии 5А:
1 – габарит 160; *2* – габарит 180; *3* – габарит 200; *4* – габарит 225; *5* – габарит 250

Из формул (7)–(9) видно, что с ростом радиуса ярма частота собственных колебаний снижается. Следовательно, уровень магнитного шума будет выше у двигателей, имеющих большие геометрические размеры, при условии равенства возбуждающих сил и частот.

Это положение подтверждается результатами замеров уровней звука двигателей габарита 225 (9 кВт) в диапазоне частоты от 63 до 4000 Гц со статорами, имеющими различный средний радиус ярма.

На рис.4 приведены кривые зависимости собственных частот двигателей привода лифтов габаритов 160, 180, 200, 225 и 250 мм от среднего радиуса ярма для разных значений r при $h/R_c \approx$ $\approx$ 0,15 и $m \equiv h$. Из графиков следует, что наиболее опасная – эллиптическая форма деформации (рис.1,*в*), так как в этом виде колебаний частоты собственных колебаний самые низкие (не более 1000 Гц), и, следовательно, вибрация и шум будут существенно выше, чем при $r = 0$ или $r > 2$.

Естественно, что гармоники силы, имеющие равные порядки и частоты вращаются или пульсируют при условии равенства их угловых частот по значению и знаку. Наибольшая деформация возникает при резонансе, т.е. при совпадении или достаточном приближении частоты вибровозмущающей силы к частоте собственных колебаний статора.

Частоты, при которых возникают радиальные силы, обусловленные влиянием зубцовых гармоник МДС (при равномерном воздушном зазоре) определялись по формуле (5).

Частоты вибровозникающих сил нулевого и чётных порядков (r = 2, 4), возникающих от взаимодействия зубцовой гармоники МДС с гармоникой проводимости зазора, вызванной зубцами ротора или наоборот, определялись по формуле [2]:

$$f_r = 2f_0[(k_2Z_2/p)(1-s) \pm 1]. \qquad (10)$$

Результаты расчётов приведены в табл.1.

При динамическом эксцентриситете взаимодействие гармоник поля порядка ($p \pm a$) с основной гармоникой приводит к взаимодействию не только вращательной силы одностороннего магнитного тяжения (r = 1), но и радиальных сил, вызывающих как эллиптическую деформацию осевой линии сечения статора (r = 2), так и изгибные деформации последней ($r \geq 3$).

Частота этил сил [2]

$$f_r = f\,[k_2Z_2/p \pm a/p + 2], \qquad (11)$$

где a = 1÷5.

Результаты расчёта частот радиальных сил по формуле (11) для a = 1 приведены в табл.2.

Сопоставляя результаты расчётов частот радиальных сил (табл.1, 2) с частотами собственных колебаний статора (рис.2), отмечаем близость к резонансу при определённых значениях частот. Это имеет место как при переходе от габарита к габариту, так и для разных скоростей.

На рис.5 показаны спектрограммы воздушного шума двухскоростного двигателя привода лифтов типа 5АН180М6/24 (4,5 кВт, Z_2 = 54) при пуске и работе на обмотке с p = 3 (рис.5,*а* и торможении и работе на обмотке с p = 12 (рис.5,*б*).

Как видно, превалирует составляющая 50 Гц (рис.5,*а*) которая обусловлена взаимодействием

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 1

Число пар полюсов	Число пазов ротора	Скольжение	Расчёт по формуле (5)			Расчёт по формуле (10)		
			Частота $\|f_r\|$ при k			Частота $\|f_r\|$ при k		
			0	±1	±2	0	±1	±2
3	42	1	100	100	100	100	100	100
		0	100	800 600	1500 1300	100	1500 1300	2900 2700
9		–2	100	800 600	1500 1300	100	1500 1300	2900 2700
		0	100	383,5 183,5	567 367	100	567 367	1033 833
3	54	1	100	100	100	100	100	100
		0	100	950 850	1900 1700	100	1900 1700	3700 3500
12		–3	100	950 850	1900 1700	100	1900 1700	3700 3500
		0	100	325 120	550 350	100	550 350	1000 900
2	58	1	100	100	100	100	100	100
		0	100	3000 2800	5900 5700	100	3000 2800	5900 5700
8		–3	100	3000 2800	5900 5700	100	3000 2800	5900 5700
		0	100	462,5 262,5	925 625	100	825 625	1550 1350
2	64	1	100	100	100	100	100	100
		0	100	1700 1500	3300 3100	100	3300 3100	6500 6300
12		–5	100	1700 1500	3300 3100	100	3300 3100	6500 6300
		0	100	366,5 166,5	633 433	100	633 433	1166 966

Таблица 2

Число пар полюсов	Число пазов ротора	Частота $\|f_r\|$ при k		
		0	±1	±2
3	42	116,7 83,35	825 575	1525 1275
9		105,55 94,44	358,5 108,5	591,5 341,5
3	54	116,7 83,35	1025 775	1925 1675
12		104,2 95,83	350 100	575 325
2	58	125 75	1575 1525	3025 2975
8		106,25 93,75	487,5 262,5	850 600
2	58	125 75	2275 2225	4425 4375
12		104,2 96	462,3 454,3	820,7 812,7

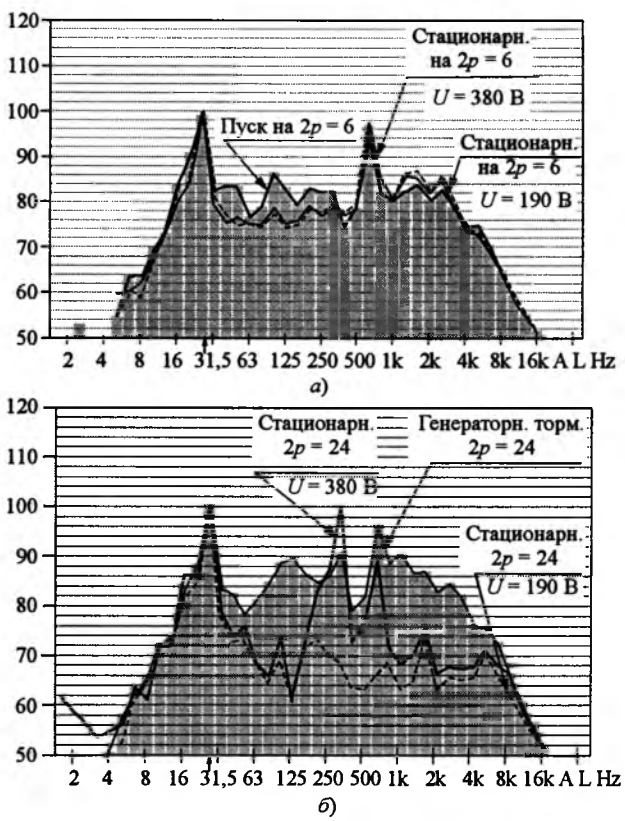


Рис.5. Пуск и работа на обмотке с $p = 3$ (*а*) и торможение и работа на обмотке с $p = 12$ (*б*)

гармоник поля с основной гармоникой и частотой 800 Гц (рис.5,*б*), которая обусловлена влиянием зубцовых гармоник МДС.

Полученные спектрограммы шумов весьма наглядны и информативны.

На спектограммах видны дискретные частоты 25, 50, 100, 200, 600 Гц при пуске на обмотке с $p = 3$ (рис.5,*а*) и 25, 50, 100, 250, 800, 1000 Гц

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

при торможении на обмотке с p = 12 (рис.5,*б*). Кроме того, экспериментально установлены частоты, при которых уровни шума при работе на обмотке с p = 3 и торможении на обмотке с p = 12 имеют высокие значения: 25, 800, 1600, 4000 Гц (см. табл. 1), т.е. имеются резонансные частоты при переходе с большой скорости на малую, что вызывает повышенный шум при торможении.

Выводы

1. Преобладающим в спектре (p = 3) является низкочастотный шум, вызванный неуравновешенностью вращающихся частей и периодическими силами, создаваемыми рабочим процессом. Для обмотки p = 12 шумы проявляют себя в диапазоне низких и средних частот, что в значительной степени обусловлено неравномерностью воздушного зазора (табл. 2).

2. Жёсткость статора и его собственная частота колебаний зависят от размеров и уменьшаются с увеличением диаметра.

3. Не существует универсальных рекомендаций, одинаково пригодных для двигателей привода лифтов всех габаритов. Требуется их экспериментальная проверка.

Список литературы

1. **Шубов И.Г.** Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергия, 1979.

2. **Астахов Н.В. Малышев В.С., Медведев В.Т., Полухин В.Ф.** Расчёт магнитных вибраций асинхронных двигателей. М.: МЭИ, 1985.

Тяговые асинхронные двигатели для приводов подвижного состава городского электротранспорта

ПИСКУНОВ С.В., ВОРОШИЛОВ В.С., ПОЛЯКОВ В.А.

Представлены результаты разработки тяговых асинхронных двигателей для привода рельсового городского транспорта. Описана конструкция, приведены параметры и условия эксплуатации, технические данные двигателей.

In the article results of development of traction asynchronous motors for rolling stock of city electric transportation driving are presented. The construction is described, parameters and service conditions, motors technical data are given.

Как известно, в тяговых приводах подвижного состава городского электротранспорта использовались двигатели постоянного тока (ДПТ). В 80-х годах были предприняты шаги с целью перевода подвижного состава городского электротранспорта с контакторно-реостатного привода систем постоянного тока на привод переменного тока на базе асинхронных двигателей с частотным управлением.

В связи с этим в ОАО НИПТИЭМ был разработан асинхронный двигатель АТЧ250S4У2 мощностью 75 кВт для привода шестиосных трамваев.

Как показала практика, применение привода переменного тока с асинхронными двигателями, по сравнению с приводом постоянного тока, наряду с устранением недостатков, присущих ДПТ, повышает надёжность привода в целом, снижает эксплуатационные расходы и электропотребление до 40%.

В настоящее время специалистами ОАО "НИПТИЭМ", на основе новых технических требований к тяговым двигателям проведена модернизация двигателя мощностью 75 кВт и спроектирован тяговый асинхронный двигатель мощностью 55 кВт для привода четырёхосных существующих и перспективных вагонов подвижного составе городского электротранспорта.

Двигатели предназначены для работы в приводах переменного тока в режимах S1, S4, S5 по ГОСТ 183 при питании от статических преобразователей частоты на базе автономных инверторов напряжения, соответствуют техническим условиям [1], ГОСТ 2582. Регулирование частоты вращения вала двигателя в составе тягового привода производится от нуля до синхронной (1500 об/мин) по закону с постоянным моментом, от синхронной до максимальной с постоянной мощностью. Двигатели допускают работу при любом направлении вращении вала.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Тип двигателя	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения синхронная, об/мин	Диапазон частоты вращения, об/мин	Момент номинальный, Н м	КПД, %	cos φ, о.с.	M_{max} / $M_н$	Масса, кг
АТЧМ250S4У2	75,0	450	1500	0 ÷ 4000	485	93,0	0,87	≥2,7	480
АТ225М4У2	55,0				350	92,0	0,86	≥ 3,5	350

Примечание: M_{max} и $M_н$ – максимальный и номинальный моменты, соответственно.

Номинальные технические данные двигателей, нормированные при питании от сети трёхфазного напряжения частотой 50 Гц в продолжительном (S1) режиме работы, приведены в таблице.

Двигатели изготавливаются для микроклиматических районов с умеренным (У) климатом для работы в условиях, определяемых категорией размещения 2 ГОСТ 15150 на высотах до 1200 м над уровнем моря, в среде с содержанием пыли до 100 мг/м^3, в интервале температур от –45 до + 40°С и относительной влажности до 100% при 25°С. Могут эксплуатироваться при вибрации от внешних источников с ускорением до 10 м/с^2 с частотой до 55 Гц, выдерживают одиночные удары с ускорением до 30 м/с^2. Средний уровень звука двигателя в диапазоне рабочих скоростей движения городского транспорта не превышает 90 дБ(А), а среднеквадратичное значение вибрационной скорости 2,8 мм/с.

Общий вид двигателя АТ225М4У2 показан на рис.1, двигателя АТЧМ250S4У2 на рис.2, монтажное исполнение двигателей IM 1103 по ГОСТ 2497.

Конструктивно двигатели выполняются со стальной оребрённой станиной, литыми подшипниковыми щитами из высокопрочного чугуна, степенью защиты IP54 ГОСТ 14254, способом охлаждения 1С0141 ГОСТ 20459. Сердечники статора и ротора изготавливаются из штампованных листов электротехнической стали 2212 толщиной 0,5 мм. Обмотка статора – всыпная из круглого эмалированного провода со стекловолокнистой изоляцией класса нагревостойкости Н (температурный индекс 180°С), ротора – короткозамкнутая литая из алюминия. Охлаждение осуществляется путём обдува станины внешним центробежным вентилятором, расположенным на валу двигателя со стороны, противоположной приводу, и закрытым защитным кожухом. Вентиляционные узлы двигателей спроектированы из условия обеспечения перегрева двигателей, соответствующего классу нагревостойкости изоляции F, что повышает надёжность и срок службы двигателя, и соответствия по уровню шума классу 2 по ГОСТ 16372. Исходя из динамики работы тя-

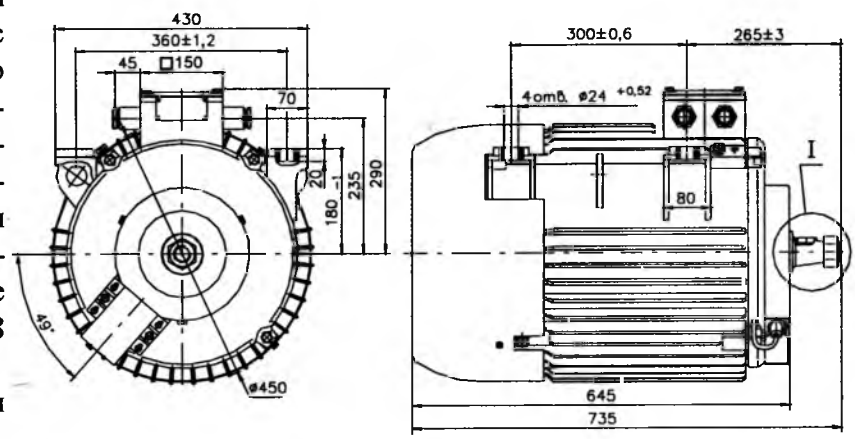


Рис.1

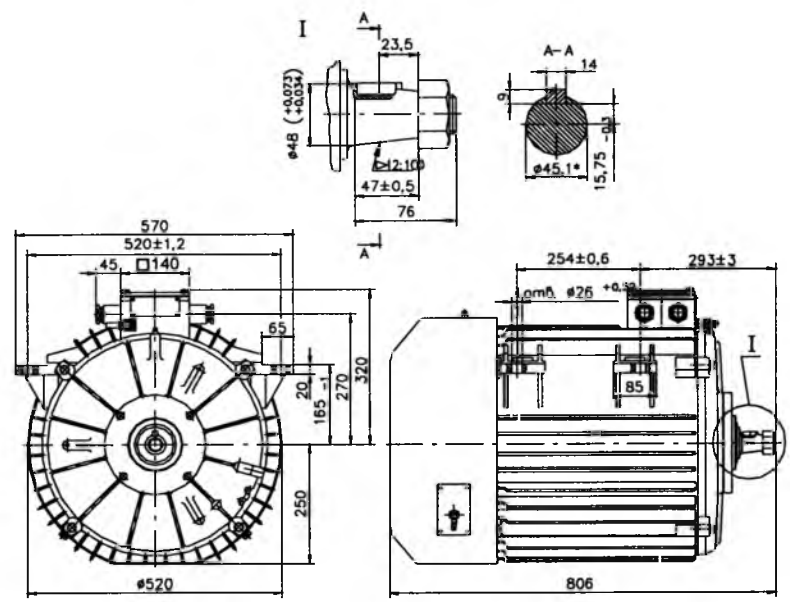


Рис.2

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

говых двигателей, конструкция магнитопровода ротора и материал заливки обеспечивают повышение кратности максимального момента примерно на 30% по сравнению с двигателями общепромышленного применения. Для постоянного теплового контроля за работой двигателя в каждую фазу обмотки статора встраиваются термопреобразователи сопротивления типа ТСП датчика температуры, концы которого выводятся через разъём, устанавливаемый на станине двигателя. Схема соединения обмотки – глухая звезда. Коробка выводов с тремя штуцерами (сальниками) и клеммной панелью с тремя болтами М8 для электрического подключения специальных силовых кабелей для подвижного состава устанавливается на станине. В двигателях применены однорядные шарикоподшипники и система лабиринтных бесконтактных щелевых уплотнений подшипниковых узлов, заполняемых пластичной смазкой.

Для обеспечения управления по частоте вращения в системе привода двигатели комплектуются электромагнитным датчиком частоты вращения (ДЧВ) типа ДЭ-Ф20-1. ДЧВ крепится на изолированном кронштейне, устанавливаемом на подшипниковом щите со стороны рабочего конца вала в двигателях АТ225М4У2 или со стороны вентилятора в двигателях АТЧМ250S4У2. Модулятором (ротором) ДЧВ в двигателях служит зубчатое кольцо, конструктивно составляющее одно целое с центробежным вентилятором, или зубчатое колесо, закрепляемое на валу двигателя.

Изготовитель двигателей – опытное производство ОАО "НИПТИЭМ".

В настоящее время ОАО "НИПТИЭМ" проводит работы в направлении совершенствования тяговых двигателей привода трамвая и разработки концепции тяговых двигателей для троллейбусов с высокими показателями надёжности, увеличенными межрегламентными сроками службы, диагностикой и контролем параметров при эксплуатации с использованием современных технических средств.

Пример записи обозначения двигателей при заказе и в документации другого изделия:

"Двигатель АТ225М4У2, ТУ16-04 ВАКИ. 526472.026 ТУ";

"Двигатель АТЧМ250S4У2, ТУ16-90 ВАКИ. 526572.048 ТУ".

Список литературы

1. **ТУ16-04. ВАКИ.526472.059ТУ.** Двигатель асинхронный АТ225М4У2.

2. **ТУ16-90. ВАКИ 526572.048ТУ.** Двигатель асинхронный тяговый частотноуправляемый АТЧМ250S4У2.

Асинхронные двигатели для оборудования АЭС

ВОРОШИЛОВ В.С., ГОЛЕМБИОВСКИЙ М.И., ЖИРОВ В.В., ПИСКУНОВ С.В.

Приведены характеристики разработанных асинхронных двигателей для оборудования атомных станций.

Characteristics of the developed asynchronous engines for the equipment of nuclear stations are resulted.

ОАО "НИПТИЭМ" более 25 лет ведет работы по конструированию и производству асинхронных двигателей (в дальнейшем двигатели) для привода электрооборудования (насосов, вентиляторов, задвижек и т.п.) атомных станций. Это двигатели габаритов 63–315 мм мощностью от 0,37 до 200 кВт радиационно-стойкого исполнения, предназначенные для привода агрегатов, расположенных в "чистых" помещениях и "грязных" боксах, а также для герметичной зоны АЭС. Двигатели предназначены для внутрироссийских и экспортных поставок, изготавливаются под контролем Госатомнадзора России. Право на конструирование и изготовление двигателей в исполнении для АЭС подтверждено лицензиями, выданными Федеральным надзором России по ядерной и радиационной безопасности.

В соответствии с заказами предприятий – изготовителей насосных агрегатов: НПО "Гидромаш" (г. Москва), "СМНПО им. М.В. Фрунзе" (г. Сумы, Украина), ОАО "ЛЕМАЗ" (г. Лебедянь), ОАО "Уралгидромаш"(г. Сысерть), ОАО "ЭНА" (г. Щелково), ОАО "Чеховский завод Гидросталь" (г. Чехов), ОАО "Тулаэлектропривод", АО "Катайский насосный завод" (г. Катайск) и др. – ОАО "НИПТИЭМ" выполнены заказы на разработку,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

изготовление, испытание и поставку асинхронных двигателей для комплектации насосных агрегатов, поставляемых на атомные станции России, Китая, Ирана, Индии. За последние 4 года изготовлено, испытано, принято Госатомнадзором РФ и ВО "Безопасность" более 500 асинхронных двигателей различных габаритов серий АИР, 5А, 5АМ.

Изготовление двигателей производится в соответствии с действующей на предприятии системой и программой обеспечения качества (ПОК) и системой менеджмента качества (СМК), соответствующей ГОСТ Р ИСО 9001-2001.

Двигатели соответствуют техническим требованиям заказчиков, разработанным техническим условиям, ГОСТ 183, а также требованиям нормативных документов: "Общие положения обеспечения безопасности атомных станций" ПНАЭГ-1-011, "Специальные условия поставки оборудования, приборов, материалов и изделий для объектов атомной энергетики".

Структура условного обозначения двигателей серий АИР, 5А, 5АМ:

5 – порядковый номер серии;

А – асинхронный;

М – модернизированный;

И – условное обозначение унифицированной серии;

Р – привязка мощности к установочным размерам;

63–315 – габарит (высота оси вращения, мм);

S, *M*, *L* – установочные размеры по длине станины;

2, 4, 6, 8, – число полюсов;

А – радиационно-стойкое исполнение;

3 – для "чистых" помещений и "грязных" боксов АЭС;

5 – для "герметичной" зоны;

В, ТВ, Т, ТМ, У, М, УХЛ – климатическое исполнение по ГОСТ 15150;

1, 3, 4 – категория размещения по ГОСТ 15150.

Пример обозначения двигателя АИР250S4А3М при его заказе и записи в документации другого изделия:

– для нужд народного хозяйства: двигатель АИР250S4А3М3, ТУ 16-01 ВАКИ.526000.012 ТУ;

– для поставок на экспорт: двигатель АИР250S4А3М3, Экспорт ТУ 16-01 ВАКИ. 526000.012 ТУ.

Номинальный режим работы S1 по ГОСТ 183 (по согласованию допускаются другие режимы). Двигатели предназначены для работы от сети трёхфазного напряжения 220/380 В (габариты 63–250), 380/660 В (габариты 250–315) по ГОСТ12139 с тремя или шестью выводными концами. По требованию Заказчика машины могут быть изготовлены на другие напряжения. Частота сети 50 Гц по ГОСТ 12139. Монтажное исполнение двигателей IM1081, 2081, 3081, степень защиты двигателей IP54, вводного устройства IP55 по ГОСТ 17494; для гермозоны степень защиты двигателей и вводного устройства IP57.

Разработанные двигатели соответствуют I и II категории сейсмостойкости по ПНАЭГ-5-006-87. Уровень сейсмических воздействий МР3-8(9) баллов, П3-7(8) баллов по шкале MSK -64 и предназначены для климатических условий У3, М3, ТВ4, Т3, ТМ4,, В3, УХЛ3 по ГОСТ 15150, но могут быть изготовлены для других климатических зон. Номинальные технические данные при питании от сети трёхфазного напряжения соответствуют в основном данным базовых серий АИР, 5А, 5АМ.

Одной из новых разработок 2004 г. является конструирование ряда двигателей для насосов типа ЦВА по техническим требованиям (ТТ) заказчика НПО "Гидромаш" для поставки оборудования на АЭС "Куданкулам" (Индия). В соответствии с ТТ двигатели монтажного исполнения IM3011 по ГОСТ 2479 должны работать с допустимой осевой нагрузкой до 35000 Н, обеспечивая нормальную работу насосов. В процессе проведения расчётов и анализа была определена и принята необходимая шкала мощностей двигателей с учётом запаса на возможные отклонения по нагрузкам, в том числе по частоте и напряжению питающей сети, а также принято решение о выполнении двигателей на базе габаритов 200 и 250 серии АИР с целью унификации по активному железу и снижения стоимости технологической подготовки производства, стоимости двигателей и всей работы. Для обеспечения допустимой осевой нагрузки применены сдвоенные радиально-упорные подшипники с устройством пополнения и частичной замены консистентной смазки.

Разработанные технические условия – ТУ16-04 ВАКИ.526000.053 ТУ. Двигатели асинхронные АИР200,250...А3ТМ4 для АЭС (ОАО "НИПТИЭМ". 2004) включают в себя пять типоразмеров двигателей габаритов 200 и 250 при синхронной частоте вращения 1500 об/мин, монтажного исполнения IM3011, со степенью защиты двигате-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 1

Типоразмер двигателя	Номинальная мощность, кВт	Насос ЦВА	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{min}}{M_{ном}}$	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	Осевая нагрузка от насоса на вал, Н, не более	Масса, кг
			Скольжение, %	КПД, %	Коэффициент мощности, о.е.						
АИР200LA4	25	130/30	1,9	92,2	0,88	2,6	2,5	2,0	7,0	20000	310
АИР200L4	37	360/20		92,6	0,87	2,7	2,7	2,4	7,3	20000	334
АИР250MA4	55	220/440	1,5	93,0	0,88	2,5	2,2	2,0	7,0	25000	596
АИР250M4	75	400/35		93,5	0,88				7,5	35000	598
АИР250MB4	80	600/32, 340/44		94,0	0,89				7,0	35000	635

ля IP54, степень защиты вводного устройства IP55 по ГОСТ 17494.

Основные параметры двигателей при синхронной частоте вращения 1500 об/мин приведены в табл.1.

Двигатели предназначены для работы от сети трёхфазного напряжения номинальной частоты 50 Гц, изготавливаются на номинальное напряжение 220/380 В с шестью выводными концами и сохраняют номинальную мощность при отклонениях от номинальных значений: напряжения не более ±10%; частоты не более ±2,5% (допускается –5% ÷ +3%). Одновременное отклонение напряжения и частоты при сумме абсолютных значений отклонений, не превышающих 10%, если отклонение частоты не превышает нормы.

Двигатели обеспечивают работу в режимах в соответствии с табл.2.

Работоспособность в указанных режимах подтверждается испытаниями двигателей на нагрев при номинальной нагрузке в режиме S1 ГОСТ 183. Сейсмостойкость подтверждена расчётами на категорию II по НП-037-01. Уровень сейсмических воздействий до 7 баллов по шкале MSK-64.

Двигатели обладают способностью нести нагрузку и выдерживать колебания частоты сети:

49–50,5 Гц – при постоянной работе на номинальной мощности;

51,5–52,5 Гц
50,5–54,5 Гц
47,5–49 Гц
} до 5 мин однократно, не более 750 мин за время эксплуатации;

46–47,5 – при полной мощности 30 с однократно, не более 300 мин за все время эксплуатации.

В двигателях применена изоляция класса нагревостойкости H по ГОСТ 8865. Сопротивление изоляции обмоток двигателей относительно корпуса и между обмотками при нормальных климатических условиях испытаний по ГОСТ 15150, измеренное в холодном состоянии, составляет не менее 20 МОм. Изоляция обмоток относительно корпуса и между обмотками выдерживает испытательное напряжение 1,76 кВ в течение 1 мин при нормальных климатических условиях. Назначенный срок службы двигателей 40 лет, средняя наработка на отказ 10000 ч. Конструкция и лакокрасочные покрытия двигателей обеспечивают возможность дезактивации наружной поверхности дезактивирующими растворами с температурой до 90°С.

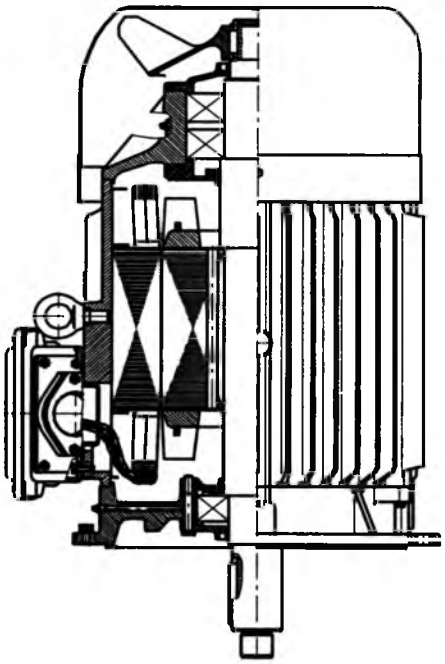
Таблица 2

Типоразмер двигателя	Режим работы по ГОСТ 183
АИР200LA4A3	S3, ПВ 30%, 1 пуск в час
АИР200L4A3	S3, ПВ 50%, не более 30 пусков в сутки с интервалом 40–50 мин
АИР250MA4A3	
АИР250M4A3	S3, ПВ 30%, 1 пуск в час
АИР250MB4A3	S1; S3 ПВ 50%, не более 30 пусков в сутки с интервалом 40–50 мин

Двигатели для насосов ЦВА имеют конструкцию (рисунок) с оригинальным подшипниковым узлом, несущим осевую нагрузку. Сердечник ротора, залитый алюминиевым сплавом, пакет статора и коробки выводов унифицированы с серийными двигателями АИР200, 250. Станина, щиты подшипниковые, спроектированные с учётом повышенных механических нагрузок, изготавливаются из чугуна повышенной прочности. Вводное устройство выполняется из алюминиевого сплава. Сердечники статора и ротора выполнены из листов рулонной электрической стали 2214 толщиной 0,5 мм. Обмотка статора всыпная из провода ПЭТД-180.

Сердечник ротора закреплён на валу горячей посадкой с упором в буртик вала. Вал ротора выполнен из стали 45. Подшипник со стороны ра-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru



Общий вид двигателя

бочего конца вала роликовый, воспринимает радиальную нагрузку, с противоположной стороны – сдвоенный радиально упорный. В подшипниковых щитах предусмотрены каналы и маслёнки для пополнения и частичной замены смазки (ЦИАТИМ-221).

Вентилятор охлаждения выполнен литым из алюминиевого сплава, крепится на шпонку на выступающем конце вала, закрыт кожухом из листовой стали.

Система изоляции, применяемые материалы, технология изготовления двигателей отличаются от серийных двигателей АИР, и соответствуют требованиям, предъявляемым к двигателям для атомных станций.

Все указанные двигатели разработаны и изготавливаются ОАО "НИПТИЭМ".

Экспериментальные исследования частотно-регулируемых асинхронных двигателей для атомных станций в специальных режимах работы

АНДРИАНОВ М.В., МАЛЫШЕВ Э.Е., РОДИОНОВ Р.В.

Рассмотрены вопросы испытаний частотно-регулируемых асинхронных двигателей в перемежающихся режимах работы. Рассматривается влияние «длинного» кабеля на электромагнитные параметры асинхронного двигателя и всего электропривода.

In article questions of test are considered is frequency – adjustable asynchronous motors in alternating operating modes. Influency of long cable on electromagnetic parameters of the motor and the variable speed drive as a whole is considered.

С развитием приводной техники асинхронные двигатели (АД) все больше стали использоваться с преобразователями частоты (ПЧ) в различных областях техники, таких как станкостроение, лифтовый привод, различные грузоподъёмные механизмы и многое другое. При этом изготовителю частотно-регулируемых АД для работы с ПЧ необходимо не только декларировать электромагнитные параметры, но и подтверждать их испытаниями. Настоящая статья посвящена экспериментальным исследованиям, проведённым в ОАО "НИПТИЭМ", по определению электромагнитных параметров электроприводов (ЭП) с частотно-регулируемыми АД, работающих в специальных режимах и предназначенных для эксплуатации на АЭС.

В ОАО "НИПТИЭМ" были разработаны электродвигатели 5А160S6БЕА5 мощностью 11 кВт и синхронной частотой вращения 1000 об/мин для АЭС. АД, предназначенные для комплектации ЭП перегрузочных машин, устанавливаются в герметичной оболочке реакторного отделения АЭС. Двигатели предназначаются для использования в системе автоматического регулирования частоты вращения в перемежающемся режиме (S8) по ГОСТ183. Циклограмма перемежающегося режима задана в табл.1.

Питание АД осуществляется от ПЧ фирмы "Siemens" типа "Midimaster vector" модель 6SE3223 мощностью 15 кВт. В рассматриваемых условиях эксплуатации АД может подвергаться

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 1

Продолжительность режима, с	Вращающий момент M, Н·м	Частота вращения n, об/мин	Скорость перемещения грузоподъёмного механизма, м/мин
90±2	12±2	1370±50	10
110±5	12±2	45±5	0,3
132±5	22±5	290±30	1,8
20±1	22±5	1475±15	10
310±15	0	0	0
440±20	40±5	87±10	0,54
38±2	22±5	1370±50	10
200±10	40±5	45±5	0,3
62±3	22±5	1370±50	10
300±15	0	0	0

воздействию радиации, сохраняя при этом работоспособность, поэтому для защиты ПЧ от воздействия радиации соединение АД с ПЧ осуществляется с помощью кабеля длиной 50 м, а сам преобразователь устанавливается в защитном сейфе. Длинные соединительные кабели оказывают влияние на электромагнитные параметры ЭП, качество управления, в обмотке двигателя особенно проявляются волновые явления, обусловленные ШИМ. Поэтому в программу квалификационных испытаний помимо объёма испытаний нерегулируемых АД были дополнительно включены следующие экспериментальные исследования:

– исследование спектра выходного напряжения ПЧ на различных частотах первой гармоники;

– исследование зависимости пиков напряжения на выводах АД и среднеквадратичного значения напряжения от частоты несущей ШИМ при соединении двигателя с преобразователем кабелем длиной 50 м;

– исследование электромагнитных параметров ЭП при соединении АД с ПЧ коротким (l = 2 м) и длинным (l = 50 м) кабелем при векторном управлении АД и при управлении по закону U/f = const;

– испытания на нагревание в режимах работы S1 и S8[1].

Спектральный анализ проведён аппаратурой фирмы "Брюль и Къер". Исследуемый сигнал выходного напряжения ПЧ измерялся с помощью датчиков ДНХ и измерительного усилителя 2610, селектировался третьоктавным фильтром 1618 и регистрировался самописцем 2307 [1]. Спектрограммы напряжения при различных частотах первой гармоники несущей ШИМ 4 кГц показаны на рис.1.

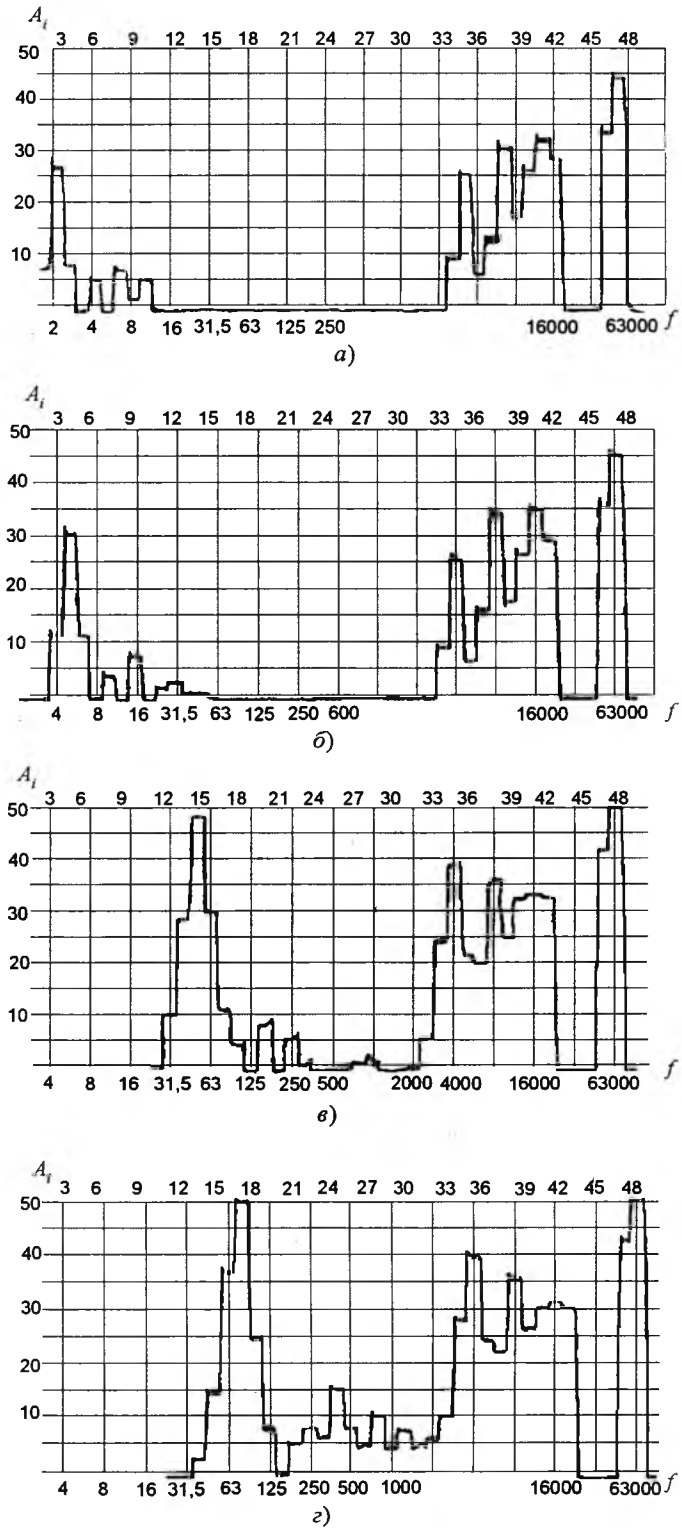


Рис.1. Спектрограммы напряжения при:
а – частота 1-й гармоники 2,6 Гц; *б* – 5 Гц; *в* – – 50 Гц; *г* – 75 Гц

Содержание соответствующей гармоники в спектре выходного напряжения ПЧ

[1] Авторский коллектив выражает благодарность за помощь в проведении исследований испытателям электрических машин Н.М. Агафоновой, С.А. Серебряковой, Т.И. Гавриловой.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$k_i = A_{\text{ск.з}} - A_i; \quad (1)$$

где k_i – коэффициент i-й гармоники, дБ; $A_{\text{ск.з}}$ – среднеквадратичное (действующее) значение напряжения или тока, дБ; A_i – значение i-й гармоники напряжения, дБ.

В относительных единицах выражение (1) имеет вид:

$$k_{i*} = 10^{-\frac{k_i}{20}}. \quad (2)$$

Следует отметить, что в ПЧ реализован алгоритм формирования выходного напряжения с синусоидальной опорной волной, что обеспечивает высокое качество выходного напряжения с низким содержанием гармоник с частотами до 2 кГц включительно.

На частотах выше 2 кГц проявляются волновые свойства "длинного" кабеля и обмотки АД. Волновые свойства обмотки можно охарактеризовать волновой ёмкостью обмотки.

При расчёте волновой ёмкости обмотки статора следует разбить обмотку на две части: пазовую и лобовую. Ёмкости на единицу длины обмотки

$$C_{0\text{п}} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{d_{\text{пр}} + b_{\text{ср}}}{d_{\text{гол}}}\right)} s_{\text{р}} \frac{z_1}{3} na; \quad (3)$$

$$C_{0\text{л}} = \frac{\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{d_{\text{пр}} + \Delta}{d_{\text{гол}}}\right)} s_{\text{р}} \frac{z_1}{3} na, \quad (4)$$

где $d_{\text{гол}}$ – диаметр голого провода, мм; $d_{\text{пр}}$ – диаметр провода с изоляцией, мм; $b_{\text{ср}}$ – ширина паза статора, мм; Δ – средний зазор между проводами.

Ёмкость пазовой части обмотки статора

$$C_{\text{п}} = C_{0\text{п}} l_1. \quad (5)$$

Ёмкость лобовой части фазы обмотки статора

$$C_{\text{л}} = C_{0\text{л}} l_{\text{л}1}. \quad (6)$$

Приведённая ёмкость фазы обмотки статора определяется согласно (5) и (6):

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{п}} + \frac{C_{\text{п}} C_{\text{л}}}{C_{\text{п}} + C_{\text{л}}}. \quad (7)$$

Обмоточные данные исследуемого двигателя
– число проводников в пазу $S_{\text{р}}$ =14;
– число элементарных проводников n = 4;
– число пазов статора z_1 = 54;
– длина пакета l_1 = 145 мм;
– средняя длина лобовых частей обмотки $l_{\text{л}}$ = 155 мм;
– число параллельных ветвей a = 1;
– число витков w = 126.

На статоре АД уложена однослойная концентрическая обмотка "вразвалку", у которой $C_{\text{пр}}$ = = 45 нФ. Оценку влияния удлинённого кабеля привода можно получить после исследования пиковых значений напряжений, приведённых в табл.2 в зависимости от частоты коммутации ключей инвертора ПЧ, при действующем значении линейного напряжения первой гармоники 380 В и частоте первой гармоники 50 Гц.

Таблица 2

Частота несущей ШИМ $f_к$, кГц	2	4	8	16
Среднеквадратичное значение линейного напряжения $U_{\text{ск.з}}$, В	420	490	550	640
Пиковое значение линейного напряжения $U_{\text{пик}}$, В	1630	1750	1950	2100

Следует иметь ввиду, что на первый виток первой катушки катушечной группы приходится до 75% пикового напряжения [2]. Согласно [3] максимальное пиковое значение напряжения для низковольтных АД составляет 1400 В. Наибольшее пиковое значение напряжения зафиксировано при частоте коммутации силовых ключей ПЧ 16 кГц и составляет 2100 В.

Оценка КПД и коэффициента мощности проводилась по известным выражениям:

$$\eta = \frac{Mn}{9{,}55P_3} 100\%, \quad (8)$$

где P_3 – подводимая мощность к ЭП, Вт; M – момент на валу АД, Н·м; n – частота вращения, об/мин;

$$\cos\varphi = \frac{P_3}{\sqrt{3}\, U_{\text{с}}\, I_{\text{вх}}}, \quad (9)$$

где $U_{\text{с}}$ – напряжение питания ПЧ, В; $I_{\text{вх}}$ – входной ток, А.

Напряжение питания ПЧ 380 В поддерживалось на всех этапах испытаний постоянным. Результаты исследования энергетических характеристик, полученные при векторном управлении, приведены в табл.3. При векторном управлении поддерживается постоянство намагничивающего тока, при этом заметно ухудшается КПД – порядка нескольких процентов на всех частотах вращения при соединении АД с ПЧ посредством кабеля длинной 50 м, коэффициент мощности изменяется мало.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 3

Частота первой гармоники f_1, Гц		2,6	2,6	5	15	70	70	75
Частота вращения n, об/мин.		53	50	93	295	1393	1386	1476
Вращающий момент M, Нм		11,8	41,2	40,2	21,6	11,8	21,6	21,1
Входной ток преобразователя частоты $I_{вх}$, А	Без кабеля	2,0	2,85	3,17	3,9	5,7	9,7	10,0
	С кабелем	2,25	3,09	3,38	4,2	6,3	10,5	10,5
Выходной ток преобразователя частоты $I_{вых}$, А	Без кабеля	16,0	17,5	17,2	15,4	7,3	8,5	8,6
	С кабелем	16,0	17,5	17,2	15,4	7,3	8,5	8,6
Подводимая мощность $P_э$, Вт	Без кабеля	627	960	1101	1320	2200	3800	3900
	С кабелем	726	1050	1233	1494	2400	3980	4000
КПД η, %	Без кабеля	10,4	22,5	35,5	48,1	78,1	82,5	83,5
	С кабелем	8,8	20,5	31,7	44,7	71,7	78,7	81,5
Коэффициент мощности cos φ	Без кабеля	0,475	0,510	0,526	0,513	0,574	0,621	0,59
	С кабелем	0,489	0,514	0,553	0,539	0,577	0,598	0,577

При управлении частотой вращения ЭП по закону U/f = const достигаются более высокие энергетические показатели, однако на низких частотах проявляется ослабление магнитного потока АД из-за падения напряжения в активном сопротивлении обмотки статора и кабельной линии (табл.4).

Испытания на нагревание в режиме S1 выполнялись согласно ГОСТ 7217, причём нагрузка испытуемого двигателя регулировалась балансирной машиной типа MS2821. Для решения задачи поддержания постоянной нагрузки двигателей при низких частотах вращения в режиме S8 инженерами испытательного центра ОАО "НИПТИЭМ" был разработан стенд для испытания частотно-регулируемого АД в составе привода в перемежающемся режиме (рис.2).

Напряжение подаётся через индукционный регулятор (*ИР*) на вход *ПЧ* и поддерживается постоянным в течение всего времени испытания. В качестве нагрузочной машины использовался АД мощностью 18,5 кВт с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. Испытуемый АД соединялся с нагрузочным АД (*НАД*), через обмотку которого протекает постоянный ток. Обмотки *НАД* соединены в треугольник для уменьшения тока через выпрямитель (*В*). Значение постоянного тока регулируется в зависимости от режима работы (табл.1.) с помощью регулируемого источника переменного напряжения (*РИПН*), соединенного с *НАД* через выпрямитель. Переключение частот вращения осуществлялось посредством *ПЧ*.

Таблица 4

Частота первой гармоники f_1, Гц	2,6	3,6	5	15
Частота вращения n, об/мин	34	53	85	290
Вращающий момент M, Н·м	41,9	41,9	41,9	22,5
Входной ток преобразователя частоты $I_{вх}$, А	2,1	2,25	2,81	3,77
Выходной ток преобразователя частоты $I_{вых}$, А	12,2	12,3	12,4	11,6
Подводимая мощность $P_э$, Вт	654	750	900	1200
КПД η, %	22,8	31,0	41,4	56,9
Коэффициент мощности cos φ	0,472	0,505	0,485	0,483

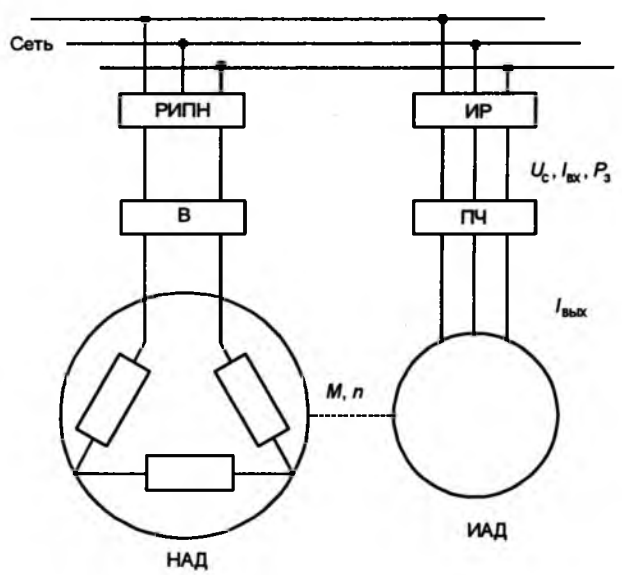


Рис.2. Схема стенда для испытания частотно-регулируемого АД

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

При испытании АД в составе привода на нагревание контролировались параметры: входное напряжение U_c, подводимая мощность $P_з$, входной ток ПЧ $I_{вх}$, выходной ток ПЧ $I_{вых}$ и частота вращения n. Нагрузка регулировалась по контролируемым параметрам для каждой частоты вращения отдельно (табл.3), при этом изменялся намагничивающий постоянный ток *НАД*. Результаты испытаний на нагревание в режимах S1 и S8 приведены в табл.5.

Таблица 5

Режим работы	S1	S8
Ток статора I_1, А	23,04	*
Частота f, Гц	50	*
Превышение температуры обмотки $Q_{м1}$, °С	75,2	35,0
Превышение температуры корпуса $Q_к$, °С	47,0	22,2
Температура окружающей среды, °С	16,5	19,1
* Ток статора и частота изменялись в соответствии с циклограммой, значения их приведены в табл.3.		

Следует отметить, что применение торможения постоянным током эффективно при малых частотах вращения, а при больших частотах вращения требуется большой постоянный ток, что может привести к перегреву нагрузочного АД. Указанного недостатка лишено устройство [4, 5], так как при больших частотах вращения используется рекуперативное торможение.

Выводы

1. Разработана методика испытаний частотно-регулируемых АД, работающих в специальных режимах работы, которая может быть применена для исследования электромагнитных параметров частотно-регулируемых АД, работающих в аналогичных режимах работы.

2. По результатам испытаний на нагревание, проведенных в режимах S1 и S8, определено, что АД выбран с большим запасом по мощности и заказчику может быть рекомендовано применение электродвигателя меньшей мощности типа 5AM112MB6 (4 кВт) с синхронной частотой вращения 1000 об/мин [6]. При этом реализуются все режимы работы по циклограмме табл.1 и возможно использование ПЧ меньшей мощности (5,5 кВт).

3. Анализ влияния удлиненного кабеля на электромагнитные параметры привода показал, что возрастает потребляемый ток ЭП и подводимая мощность, уменьшается КПД по сравнению с испытаниями проведенными при соединении АД с ПЧ посредством короткого кабеля.

4. Определена зависимость пиков напряжения от частоты несущей ШИМ при соединении двигателя с преобразователем с помощью кабельной линии длиной 50 м. Волновая ёмкость обмотки рекомендуемого электродвигателя меньше, чем у двигателя 5A160S6БЕА5, что позволяет уменьшить пики напряжения и увеличить надёжность привода.

Список литературы

1. **Андрианов М.В., Родионов Р.В.** Особенности электрических измерений при испытаниях асинхронных двигателей, работающих с преобразователями частоты // Электротехника. 2004. №3.

2. **Berth M., Eberhardt M., Kaufhold M., Speck J.** Electrische Belastung und Ausfallverhalten der Wicklungsisolierung von Asynchronmaschinen bei Umrichterspeisung. TU Dresden.

3. **IEC TS 60034-17.** Rotating electrical machines – Part 17: Cage induction motors when fed from converters – Application guide.

4. **Пат. 37835 РФ.** Устройство для испытания асинхронных двигателей / М.В. Андрианов, Р.В. Родионов // Открытия. Изобретения. 2004. № 13.

5. **Пат. 41877 РФ.** Автоматизированный стенд для испытаний частотно-регулируемых асинхронных двигателей / М.В. Андрианов, Р.В. Родионов //Открытия. Изобретения. 2004. №31.

6. **Андрианов М.В., Родионов Р.В.** Вопросы выбора электродвигателя в регулируемом электроприводе на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором// Электротехника. 2002. №11.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Трёхфазные асинхронные двигатели специальных конструктивных исполнений для комплектных частотно-регулируемых приводов

ВАСИЛЬЧЕНКО В.А., ВЕРШИНИН А.В., ЗАЙЦЕВ А.М., СИЖАНОВ И.С.

Обозначены области применения современных частотно-регулируемых электроприводов, указаны основные заказчики такого оборудования. Рассмотрены вопросы разработки специальных конструктивных исполнений трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором для частотно-регулируемых электроприводов, представлен анализ конструкций, приведены основные технические характеристики таких двигателей.

Fields of modern variable-frequency electric drives application were designated. There were considered the questions of special design execution development concerning three-phase asynchronous motors with squirrel cage rotor for variable-frequency electric drives application, there were presented design analysis, mentioned main technical characteristics of such motors.

Производство компактных интеллектуальных преобразователей частоты, предназначенных для управления асинхронными электродвигателями, освоено многими зарубежными компаниями. В России более 20 крупных зарубежных фирм-производителей предлагают свои преобразователи, выполненные с использованием современных прогрессивных технологий в области цифровой электроники.

Однако остаётся основной вопрос – отсутствие исполнительного, головного механизма частотного привода – электродвигателя. Обычный асинхронный двигатель общепромышленного назначения не всегда может быть использован для работы в режиме частотного управления. Необходимо обязательное изменение конструктивной основы базового двигателя с максимальной унификацией основных конструктивных элементов. Это требует предварительных конструкторских разработок и экспериментальных исследований.

Основное направление применения комплектного частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) – замена приводов на базе двигателей постоянного тока. Это в основном машиностроение, металлургическая, химическая, пищевая, стекольная, целлюлозно-бумажная и текстильная промышленности.

На данное время предприятиями группы компаний ВЭМЗ установлено более 1000 комплектных приводов на базе асинхронных двигателей специальных конструктивных исполнений в качестве приводов подач и приводов главного движения металлорежущих станков: от двухкоординатных токарных до восьмикоординатных карусельных. В основном это станки нормального класса точности, подвергнутые модернизации. Диапазон мощностей установленных приводов – от 0,75 до 160 кВт. Точность станков, в зависимости от применяемых датчиков обратной связи и состояния механической части, составила от ±1 до ±5 мкм "по электронике" и от 0,003 до 0,20 мм по обработке.

В настоящее время нашими постоянными партнерами по внедрению комплектного ЧРЭП в станочном оборудовании являются: ОАО "САВМА", ОАО "ЭНИМС" (г. Москва), группа компаний "СЕДИН" (г. Краснодар), ОАО "КАМАЗ", ОАО "Ивановский завод тяжелого станкостроения", ООО "Сервис-СТМ", ООО "Владимирский завод токарных станков", ОАО "САСТА", ОАО "Коломенский завод тяжелых станков", ОАО "Рязанский станкостроительный завод", "Минский завод Октябрьской Революции", ОАО "Орловское ЦТО", ОАО "Выксунский металлургический завод" (г. Выкса), ОАО "Тяжстанкогидропресс" (г. Новосибирск), ОАО "Красный пролетарий" и другие предприятия этой отрасли.

Второе направление применения ЧРЭП – энергосбережение. По статистике более 60% разнообразных механизмов, работающих на нашей планете, используют асинхронные двигатели, которые потребляют почти 30% всей электроэнергии, вырабатываемой в мире. Поэтому наиболее рациональным использованием ЧРЭП на базе преобразователей частоты и трёхфазных асинхронных двигателей специальных конструктивных исполнений являются энергоресурсосберегающие системы. В приводах с вентиляторной нагрузкой, к которым относятся центробежные насосы, вентиляторы, воздуходувки, потребление электро-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

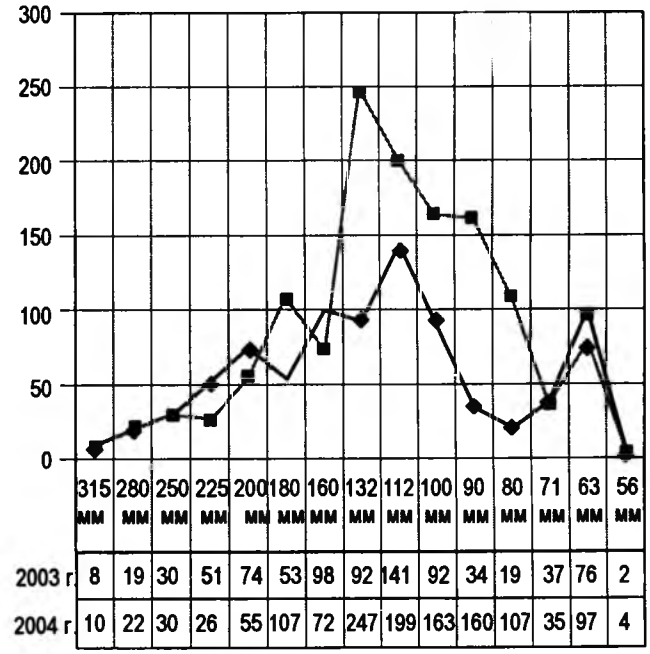
энергии зависит от частоты вращения исполнительного органа. Наибольшего эффекта в таких системах можно достичь при изменении частоты вращения электродвигателя посредством частотного регулирования. Например, КПД насоса и электродвигателя с изменением расхода практически не снижаются, но уменьшается производительность насоса при сохранении необходимого напора, поэтому существенно снижаются удельные расходы электроэнергии. Таким образом, применение преобразователей частоты позволяет не только оптимизировать работу асинхронных двигателей и резко увеличить ресурс их работы, но и реально экономить электроэнергию.

Сейчас поставленное предприятиями группы компаний "ВЭМЗ" оборудование успешно работает на объектах теплоэнергетики и ЖКХ Владимира и Владимирской обл., в Нижнем Новгороде и Нижегородской обл., в Ставропольском крае, Костроме и Костромской обл., Ивановской обл., в Брянске, Перми, Новокузнецке, Екатеринбурге, Омске, Оренбурге, Кемерове, Твери, Кирове, Иркутске, Нефтеюганске и многих других регионах РФ. Более 100 преобразователей частоты мощностью от 5,5 до 75 кВт поставлены предприятию "Мостеплоэнергоремонт" для модернизации ряда ЦТП и РТС Москвы.

Опыт работы в этой области позволяет утверждать, что интерес к энергосберегающему оборудованию в последние годы возрос и частотно-регулируемый электропривод стал интересен предприятиям ЖКХ многих городов РФ, предприятиям энергетики и нефтехимической промышленности. Сейчас реально можно говорить о полутора – двухлетнем сроке окупаемости, но есть объекты, где даже при сегодняшних ценах срок окупаемости оборудования составляет менее года.

В настоящее время предприятиями группы компаний "ВЭМЗ" налажена разработка и производство под заказ трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором специальных конструктивных исполнений для ЧРЭП. Эти работы были начаты в 2000 г.

Разработка и изготовление асинхронных двигателей для ЧРЭП выполняется с учётом требований конкретного заказчика, так как каждый заказ имеет свои особенности. Это обстоятельство затрудняет разработку полной и постоянной конструкторской документации, хотя за это время и отработаны определённые, постоянно используемые, основные конструктивные исполнения.



	315 мм	280 мм	250 мм	225 мм	200 мм	180 мм	160 мм	132 мм	112 мм	100 мм	90 мм	80 мм	71 мм	63 мм	56 мм
2003 г.	8	19	30	51	74	53	98	92	141	92	34	19	37	76	2
2004 г.	10	22	30	26	55	107	72	247	199	163	160	107	35	97	4

Рис.1. Диаграмма распределения количества изготовленных в 2003 и 2004 гг. двигателей для ЧРЭП по высотам оси вращения:
◆– 2003 г.; ■– 2004 г.

В настоящее время разработка конструкторской документации (КД) на двигатели для ЧРЭП происходит по следующей схеме:

– анализ требований, изложенных в заказе, их уточнение и согласование с заказчиком;

– разработка временной КД на изготовление базового двигателя;

– разработка временной КД на изготовление двигателя для ЧРЭП. Ежемесячно разрабатывается около 25 комплектов временной КД на двигатели для ЧРЭП.

Ежемесячно разрабатывается около 25 комплектов временной КД на двигатели для ЧРЭП, каждый комплект содержит 12–15 листов чертежей. Выполнение такого объёма работ стало возможным только благодаря широкому использованию в работе комплекса САПР Pro/ENGINEER.

В 2003 г. было разработано и изготовлено 826 двигателей для ЧРЭП, в 2004 г. – 1334 двигателя. На рис.1 представлено распределение изготовленных двигателей по высотам оси вращения.

Двигатели разрабатываются и изготовляются в следующих основных конструктивных исполнениях:

– специальное исполнение асинхронного трехфазного короткозамкнутого двигателя для ЧРЭП без дополнительных элементов (группа 1А);

– асинхронный трёхфазный короткозамкнутый

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

двигатель с независимой системой охлаждения (группа 1В);

– асинхронный трёхфазный короткозамкнутый двигатель с пристроенным датчиком обратной связи, с независимой системой охлаждения (группа 2В);

– асинхронный трёхфазный короткозамкнутый двигатель с пристроенным электромагнитным тормозом и обдувом наружной поверхности вентилятором, установленным на валу двигателя (группа 3А);

– асинхронный трёхфазный короткозамкнутый двигатель с пристроенным электромагнитным тормозом, с независимой системой охлаждения (группа 3В);

– асинхронный трёхфазный короткозамкнутый двигатель с пристроенным электромагнитным тормозом, с пристроенным датчиком обратной связи, с независимой системой охлаждения (группа 4В).

По согласованию с заказчиком двигатели могут изготовляться в других конструктивных исполнениях.

Распределение двигателей для ЧРЭП, изготовленных по заказам в 2003 и 2004 гг., по группам конструктивных исполнений и высотам оси вращения представлено в табл.1.

Из приведенных в табл.1 данных видно, что наибольшее количество двигателей (около 80 %) – это двигатели для ЧРЭП с независимой системой вентиляции или с самообдувом, с датчиком обратной связи или без него. Основное назначение двигателей таких конструктивных исполнений – ЧРЭП для энергосберегающих систем и привода с небольшим диапазоном регулирования частоты вращения.

Для обозначения двигателей для ЧРЭП применяется условное обозначение, которое состоит из условного обозначения базового двигателя и цифрового кода специального конструктивного исполнения. Цифровой код специального конструктивного исполнения двигателей состоит из четырех цифр.

Первая цифра – кодировка конструктивного исполнения по способу охлаждения двигателя по ГОСТ20459 (МЭК 60034-6):

0 – IC 0141 закрытая машина с внутренней самовентиляцией и обдувом наружной поверхности вентилятором, установленным на валу двигателя;

1 – IC 0641 закрытая машина с внутренней самовентиляцией и обдувом наружной поверхности электровентилятором, установленным на двигателе; питание электровентилятора осуществляется от сети однофазного переменного тока;

2 – IC 0641 закрытая машина с внутренней самовентиляцией и обдувом наружной поверхности электровентилятором, установленным на двигателе; питание электровентилятора осуществляется от сети трёхфазного переменного тока;

3 – IC 0641 закрытая машина с внутренней самовентиляцией и обдувом наружной поверхности вентилятором с приводом от отдельного трёхфазного асинхронного двигателя, пристроенного на обдуваемом двигателе;

9 – IC 0041 закрытая машина с внутренней самовентиляцией и естественным (конвекционным) охлаждением наружной поверхности.

Таблица 1

Высота оси вращения, мм	2003 г.				2004 г.			
	Группа двигателей							
	1А, 1В	2В	3А, 3В	4В	1А, 1В	2В	3А, 3В	4В
56	2	–	–	–	–	–	4	–
63	65	2	7	–	93	–	2	–
71	13	15	1	2	11	3	19	–
80	10	3	5	1	17	63	22	5
90	8	17	8	–	140	5	11	4
100	48	36	8	–	34	112	4	13
112	21	19	48	53	6	31	48	114
132	18	48	4	12	80	120	27	20
160	29	57	4	4	8	60	3	1
180	34	16	–	1	64	39	1	3
200	32	35	6	–	13	36	6	–
225	42	8	–	–	11	12	3	–
250	17	11	–	–	8	22	–	–
280	10	8	–	–	9	13	–	–
315	3	5	–	–	5	5	–	–
Всего	352	280	91	73	499	521	150	160
%	44,2	35,2	11,4	9,2	37,5	39,2	11,3	12,0

Вторая и третья цифры – кодировка типа и конструктивного исполнения датчика обратной связи в зависимости от числа импульсов выходного сигнала, его формы, напряжения питания и класса точности.

Исполнение двигателя без датчика – **00**.

Четвертая цифра – кодировка типа и конструктивного исполнения пристроенного электромагнитного тормоза:

0 – двигатель без тормоза;

1 – двигатель с пристроенным тормозом фирмы КЕВ соответствующего типоразмера (типоразмер определяется в за-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

висимости от значения номинального момента двигателя);

2 – двигатель с пристроенным тормозом фирмы КЕВ соответствующего типоразмера и устройством для ручного растормаживания.

Таблица 2

Категория по ГОСТ 20815	Частота вращения, об/мин	$v_{эф.м}$, мм/с, для высоты оси вращения, мм			
		56–71	80–132	160–225	250–315
R	$600 \le n \le 1800$	0,71	0,71	1,12	1,8
	$1800 < n < 4500$	0,71	1,12	1,8	2,8
S	$600 \le n \le 1800$	0,45	0,45	0,71	1,12
	$1800 < n < 4500$	0,45	0,71	1,12	1,8

Двигатели изготавливаются на номинальные мощности от 0,25 до 315 кВт на номинальное напряжение 380 В при частоте 50 Гц. Соединение фаз – Δ (треугольник) или Y (звезда). По требованию заказчика двигатели могут изготавливаться на другие номинальные напряжения.

Двигатели изготавливаются на синхронные частоты вращения 500, 600, 750, 1000, 1500 и 3000 об/мин.

В составе комплектных ЧРЭП двигатели эксплуатируются при питании от преобразователей частоты трёхфазной сети переменного тока. Диапазон изменения частоты питания – от 0 до 300 Гц, при этом частота вращения не должна превышать 4500 об/мин для двигателей высоты оси вращения до 225 мм и 3600 об/мин для двигателей высоты оси вращения 250 мм и выше. Более высокая частота вращения устанавливается на конкретные двигатели.

Номинальный режим работы двигателей – продолжительный (S1) по ГОСТ 28173 (МЭК 60034-1). Допускается работа двигателей в режимах S2–S8, при этом допустимые нагрузки и ток определяются классом нагревостойкости изоляционной системы двигателей и обеспечиваются при регулировании системой управления.

Номинальные параметры двигателей (мощность, номинальная частота вращения, коэффициент мощности, КПД, перегрузочная способность, динамический момент инерции ротора) соответствуют параметрам, указанным в технических каталогах для базовых двигателей соответствующих габаритов, частоты вращения и класса точности.

Средний уровень звукового давления, измеренный по ГОСТ 16372, при питании от источника синусоидального переменного тока номинальной частоты и номинального напряжения не превышает значений, указанных в технических каталогах для базовых двигателей соответствующих габаритов и частоты вращения. При питании от преобразователя частоты средний уровень звукового давления двигателей не превышает указанных значений более чем:

– на +5 дБ(А) при частоте вращения, соответствующей синхронной частоте вращения базового двигателя;

– на +10 дБ(А) при максимальной частоте вращения.

Среднеквадратическое значение вибрационной скорости двигателей, измеренное в соответствии с ГОСТ 20815, при питании от источника синусоидального переменного тока номинальной частоты и номинального напряжения соответствует значениям категории R.

При питании от преобразователя частоты и регулировании частоты вращения среднеквадратическое значение вибрационной скорости двигателей не превышает значений, указанных в табл.2.

Как правило, двигатели имеют следующие климатические исполнения по ГОСТ 15150 – У2, У3 и Т2.

По устойчивости к воздействию климатических факторов внешней среды двигатели соответствуют требованиям ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543.1. При этом нижнее значение рабочей температуры устанавливается с учётом ограничений для пристраиваемых дополнительных элементов.

Степень защиты двигателей по ГОСТ 17494:

– климатических исполнений У2 и Т2 – не ниже IP54;

– климатических исполнений У3 – не ниже IP44.

По стойкости к механическим воздействиям внешней среды двигатели соответствуют группе М8 по ГОСТ 17516.1.

Двигатели имеют изоляцию класса нагревостойкости F по ГОСТ 8865 с двукратной пропиткой обмотки статора. Обмотка статоров выполняется из эмалированных обмоточных проводов марки ПЭТД-180 ТУ 16-705.264-82.

Как правило, двигатели имеют встроенный в обмотку статора датчик температурной защиты. Цепь датчика состоит из трёх последовательно соединенных и установленных в лобовые части обмотки статора терморезисторов с положитель-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ным температурным коэффициентом сопротивления, температура срабатывания 145°С.

Двигатели имеют вводное устройство К-3-II по ГОСТ Р 51689-2000. Вводное устройство имеет панель с шестью контактными болтами для подключения обмотки статора и двумя контактными болтами для подключения цепи датчика температурной защиты либо панель с тремя контактными болтами для подключения обмотки статора и отдельную клеммную панель для подключения цепи датчика температурной защиты. На корпусе вводного устройства располагаются штуцеры для ввода в него кабелей датчика обратной связи и питания пристроенного электромагнитного тормоза.

Конструктивные исполнения двигателей по способу монтажа – по ГОСТ 2479 с одним рабочим концом вала:

IM1081, IM2081 для двигателей 56–250 мм;

IM1001, IM2001 для двигателей 280–315 мм;

IM3081 для двигателей 56–180 мм;

IM3011, IM3031 для двигателей 200–250 мм.

Выполнение второго конца вала возможно только для некоторых конструктивных исполнений.

На рис.1–4 показан внешний вид ряда двигателей специальных конструктивных исполнений.

Независимая система вентиляции в двигателях для ЧРЭП применяется при эксплуатации на частотах вращения ниже 500 об/мин, когда работа вентилятора, установленного на валу двигателя, неэффективна и при эксплуатации двигателя на частотах вращения выше 3000 об/мин, когда вентилятор, установленный на валу двигателя, создает большие механические потери и значительно увеличивает шум.

Обдув осуществляется электровентилятором, имеющим осевую крыльчатку, либо отдельным асинхронным двигателем с установленной на нём осевой крыльчаткой. Электровентилятор и отдельный асинхронный двигатель устанавливаются на кожухе двигателя.

Питание электровентилятора осуществляется от сети однофазного переменного тока или от сети трёхфазного переменного тока.

Электровентилятор имеет отдельный разъём на кожухе двигателя. Степень защиты электровентиляторов IP44. Диапазон рабочих температур от –30 до +50°С.

Подбор электровентиляторов производится по объёму воздуха, исходя из суммарных потерь в двигателе в самом жёстком режиме работы.

В качестве датчика обратной связи применяются преобразователи угловых перемещений производства СКБ ИС (г. Санкт-Петербург) типа

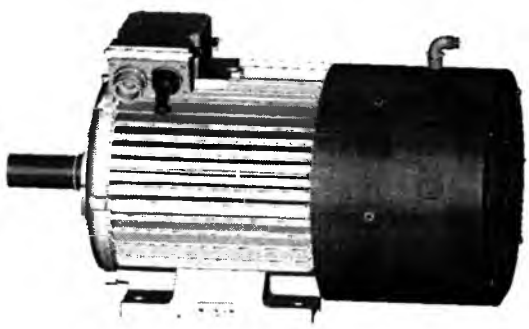


Рис.2. Внешний вид двигателя 5А225-2310, IM1081

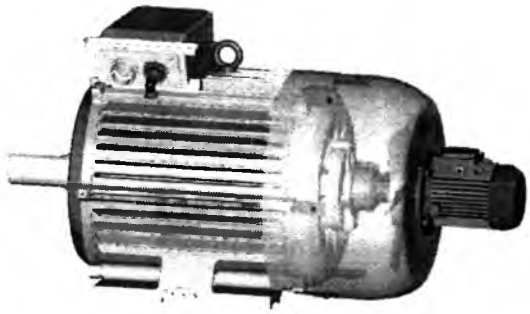


Рис.3. Внешний вид двигателя 5АМ250-3310, IM1081

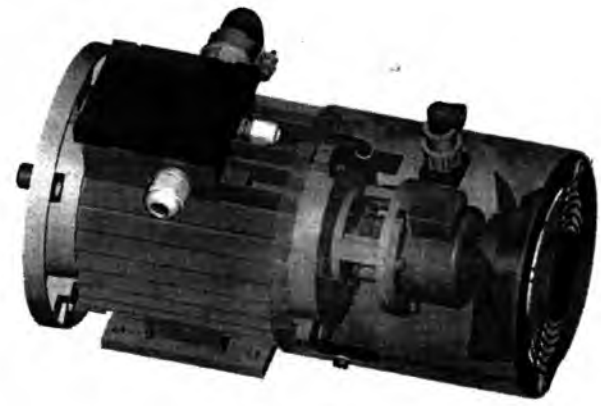


Рис.4. Внешний вид двигателя АИР63-1310, IM2081

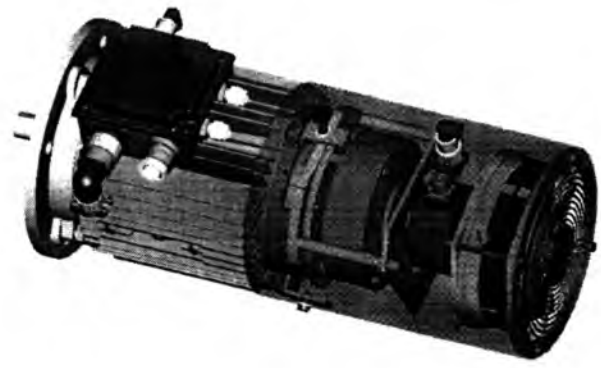


Рис.5. Внешний вид двигателя 5А80-1511, IM3081

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ЛИР-158А и ЛИР-276А, имеющие большой набор вариантов по числу периодов сигнала на оборот вала, форме сигнала, напряжению питания и классу точности.

Степень защиты ЛИР-158А и ЛИР-276А – IP64, интервал рабочих температур от –40 до +100°С.

Преобразователь угловых перемещений ЛИР-158А устанавливается и закрепляется на заднем щите или наружной крышке подшипника через адаптеры, сочленение вала двигателя и вала датчика производится с помощью муфты ЛИР-801-10-6.

Преобразователь угловых перемещений ЛИР-276А имеет жёсткую посадку ротора на вал двигателя, закрепление корпуса осуществляется через пружинные элементы.

В качестве тормозов применяются электромагнитные пружинные тормоза с двумя плоскостями для сухого трения COMBISTOP 08 или COMBISTOP 38 фирмы KEB.

Тормоза предназначены для фиксации вала электродвигателя при его отключении от питающей сети и устанавливаются на задний щит двигателя. Степень защиты тормоза IP44. Диапазон рабочих температур от –45 до +50°С. Питание тормоза осуществляется от сети постоянного тока напряжением 24, 105, 180, 205 В либо от однофазной сети переменного тока через выпрямитель.

Разработка специальных конструктивных исполнений трёхфазных асинхронных короткозамкнутых двигателей для ЧРЭП весьма актуальна и оправдана как с экономической, так и с технической точек зрения.

Новые серии преобразователей частоты и объектно-ориентированный комплектный электропривод на их основе

ВИНОГРАДОВ А.Б., СИБИРЦЕВ А.Н., ЧИСТОСЕРДОВ В.Л.

Представлены новые разработки НИЛ "Вектор" ИГЭУ в области частотного и адаптивно-векторного управления электроприводом переменного тока и некоторые аспекты применения преобразователей частоты новых серий в составе объектно-ориентированного комплектного электропривода с двигателями специальных исполнений ОАО "НИПТИЭМ".

A new elaboration of Ivanovo State Power University in the sphere of frequency and adaptive vector control of induction motor drive is presented.

Преобразователи и комплектные электроприводы серии ЭПВ представляют собой новое поколение многофункциональных, "интеллектуальных" устройств управления низковольтными (до 440 В) электродвигателями переменного тока, асинхронными и синхронными, мощностью от 1 до 400 кВт, предназначенных для регулируемого привода механизмов и технологических процессов с самыми различными требованиями к параметрам регулирования и условиям эксплуатации: от насосов и вентиляторов до высокоточных станков и следящих систем.

Системы управления всех преобразователей серии выполнены на основе универсального микроконтроллерного ядра, образованного двумя шестнадцатиразрядными микроконтроллерами. От предыдущей разработки НИЛ "Вектор" [1], выпускаемой ООО "ЭЛПРИ" Чебоксарского электроаппаратного завода с 1999 г. под маркой АПЧ, электроприводы новой серии отличаются:

– существенно более широкой областью использования, включающей объекты, требующие применения быстродействующего широкодиапазонного электропривода переменного тока, электропривода с высоким качеством двухстороннего обмена энергией с питающей сетью, а также высококачественного бездатчикового электропривода;

– улучшенными показателями регулирования скорости (быстродействием, диапазоном);

– улучшенными массогабаритными и энергетическими характеристиками;

– более высокими показателями надёжности, достигнутыми за счёт повышения степени интег-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

рации и показателей надёжности отдельных компонентов;

– широким набором входных и выходных сигналов;

– существенно расширенными функциями интерфейса и повышением производительности интерфейсных каналов;

– введением развитых функций программирования пользователем для решения разнообразных технологических задач;

– введением новых и повышением качества уже существующих режимов работы, функциональных возможностей и интеллектуальных свойств.

Среди новых режимов и возможностей [2–4] отметим следующие:

– режим адаптации к изменению активных сопротивлений двигателя, обеспечивающий инвариантность характеристик привода к температурным изменениям сопротивлений статора и ротора;

– автоматическая настройка электропривода на заданные динамические характеристики (время регулирования, полоса пропускания контура скорости, вид переходного процесса), с возможностью оптимальной настройки по Баттерворту и на монотонный процесс, соответствующий биномиальному распределению корней характеристического полинома контура скорости; возможность последующей точной подстройки в ручном режиме с помощью тестовых входных сигналов и настроечных рекомендаций;

– расширение числа параметров привода, определяемых в результате процедуры автонастройки и повышение её точности; в результате выполнения автонастройки асинхронного электропривода определяются активные сопротивления статора и ротора, индуктивности рассеяния и взаимная, момент инерции, по которым производится расчёт базовых значений всех параметров и коэффициентов системы управления электроприводом при заданных показателях качества регулирования;

– программно-реализованная структура системы управления позволяет работать в замкнутом контуре регулирования скорости или момента; минимальный полный цикл расчёта контура скорости 100 мкс, контура момента 50 мкс;

– алгоритм автоматической фазировки датчика скорости/положения исключает необходимость переключений при согласовании выходных сигналов с направлением вращения;

– наличие двух встроенных коммуникационных портов (RS-232/485 и CAN) при поддержке стандартных протоколов связи (MODBUS и CAN-Open) позволяет встраивать электроприводы в локальные информационно-управляющие сети, АСУ ТП и другие сложные системы, не требуя при этом затрат времени на освоение специфичных средств коммуникаций;

– 4 независимых набора параметров могут активизироваться аппаратно или программно для различных применений и при изменениях внешних условий работы объекта управления;

– программируемая частота модуляции (2–20 кГц) позволяет для любых применений находить оптимальное соотношение между шумами, вибрациями двигателя и дополнительными потерями в системе "преобразователь – двигатель";

– широкий набор аналоговых и цифровых входов/выходов с возможностью их перепрограммирования и наращивания путём подключения дополнительных модулей;

– пульт ручного управления выполняется встроенным в корпус преобразователя или съёмным (для установки на дверце шкафа или пульта оператора);

– различные исполнения интерфейсной платы обеспечивают подключение датчиков скорости/положения с различными типами сигналов: импульсных, синусно-косинусных, резольверов.

В качестве дополнительных опций могут подключаться:

– режим адаптации к изменению параметров механической части привода, обеспечивающий инвариантность характеристик привода к изменению момента инерции и момента нагрузки;

– компенсация динамических неидеальностей силовых ключей преобразователей энергии (задержек включения и выключения), обеспечивающая минимизацию влияния этих эффектов на характеристики электропривода, в особенности, на малых скоростях и при высоких частотах модуляции;

– режим повышенного энергосбережения, обеспечивающий минимизацию потребляемой приводом энергии при случайном характере изменения нагрузки;

– режим торможения постоянным током, обеспечивающий фиксацию вала на нулевой скорости и эффективное торможение без отвода энергии в звено постоянного напряжения;

– режим "самоподхвата" привода на заранее

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

неизвестной скорости, реализующий автоматический поиск уровня скорости и плавное вхождение в работу при включении привода с вращающимся валом двигателя; режим актуален, в частности, в электроприводах с большими моментами инерции при повторном включении в работу после кратковременного пропадания напряжения питания;

– режим программирования и настройки электропривода с помощью персонального компьютера;

– режим позиционирования вала;

– возможность обновления программного обеспечения преобразователей самим пользователем без демонтажа оборудования;

– программные макросы, предназначенные для встраивания электропривода в специфические технологические процессы (управление многонасосной станцией, станции управления лифтами, управление механизмами с упругой механикой, управление натяжением намоточных механизмов, многосвязный, многодвигательный электропривод с согласованием по скорости, моменту или угловому положению и другие применения по спецификации заказчика);

– режим предельной перегрузочной способности привода, позволяющий существенно повысить перегрузочную способность преобразователя по току в пределах того же типоразмера за счёт подключения динамической тепловой модели элементов IGBT модуля.

Серия ЭПВ включает в себя следующие исполнения:

– бездатчиковый асинхронный электропривод мощностью 3–110 кВт, предназначенный для механизмов с диапазоном регулирования скорости до 50:1, не предъявляющих повышенных требований к быстродействию и точности регулирования скорости (насосы, вентиляторы, подъёмно-транспортные средства и другие общепромышленные механизмы);

– преобразователи частоты мощностью 1–55 кВт с адаптивно-векторным управлением для высокоэффективных широкодиапазонных асинхронных и синхронных электроприводов, предназначенных для механизмов с повышенными требованиями к статическим и динамическим характеристикам (приводы главного движения и подач металлорежущих станков с диапазоном регулирования скорости от 1000 до 100000 и полосой пропускания контура скорости до 100 Гц и более);

– векторный асинхронный и синхронный электроприводы без датчика на валу двигателя, обеспечивающие высокие динамические характеристики в диапазоне регулирования скорости 100:1; предназначены для механизмов, предъявляющих повышенные требования к динамике, у которых вследствие технологических особенностей установка датчика на вал двигателя не предусматривается (экструдеры, дробилки и другие механизмы химической и горнорудной промышленности, тяговые электроприводы транспортных средств);

– рекуперативный выпрямитель мощностью 15–55 кВт с векторной системой управления, предназначенный для применения в преобразователях со звеном постоянного напряжения, реализующий функцию свободного двунаправленного обмена энергией между питающей сетью и нагрузкой с высокими энергетическими характеристиками и показателями электромагнитной совместимости; характеризуется синусоидальным сетевым током и регулируемым коэффициентом мощности, который может устанавливаться равным единице, а также "опережающим" или "отстающим"; область применения – электропривод механизмов, значительное время работающих в тормозных режимах: подъёмно-транспортные механизмы (краны, лифты и т.д.), станки, работающие в режимах частых циклов разгон/торможение, механизмы с большими моментами инерции.

Основные характеристики преобразователей частоты серии ЭПВ

Мощность, кВт 1–110;
Напряжение питания, В ..... 380 + 10/–15%;
Рабочий диапазон частот, Гц 0–400;
Частота модуляции, кГц 2–20
Допустимая перегрузка по току 1,5 в течение 30 с
с типовым двигателем ..... 2 в течение 5 с
Диапазон регулирования скорости ЭП:
с датчиком скорости ..... > 10000
без датчика скорости ..... > 50
Управление ..... адаптивно-векторное
Входы изолированные
..... аналоговые – 2 (4÷20мА), 2 (±10 В);
..... цифровые – 12 свободно программируемых;
..... вход терморезистора двигателя;
..... вход импульсного датчика скорости / положения с дублированием сигнала
Выходы изолированные программируемые .....
..... 2 канала ЦАП
..... 2 импульсных;
..... 4 логических транзисторных;
..... 2 релейных
Коммуникационные порты
(изолированные) ..... RS232/485 (протокол MODBUS);
..... CAN (протокол CAN Open)

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Взаимосвязь основных функциональных узлов электропривода показана на функциональной схеме рис.1.

Силовой модуль предназначен для преобразования сетевого напряжения постоянной частоты в напряжение переменной амплитуды и частоты для питания исполнительного двигателя.

Силовой модуль включает следующие основные элементы:

- трёхфазный мостовой выпрямитель (выпрямитель) с варисторным ограничителем перенапряжения и помехоподавляющим фильтром на входе;
- ёмкостный фильтр звена постоянного напряжения (фильтр);
- трёхфазный мостовой IGBT-инвертор;
- узел сброса энергии торможения (УСЭ), состоящий из IGBT-чоппера и внешнего балластного резистора;
- драйвер силовых ключей, обеспечивающий управление затворами IGBT, формирование сигналов защит и гальваническую развязку силовых и управляющих цепей;
- вентилятор, управляемый в функции сигнала температуры силового модуля;
- узел предзаряда ёмкости фильтра, обеспечивающий ограничение тока заряда и плавное нарастание напряжения на конденсаторах.

Датчиковая система формирует нормированные сигналы обратных связей с гальванической развязкой силовых и управляющих цепей. Она включает:

- датчик напряжения *VD*, состоящий из резистивного делителя и изолирующего усилителя с оптронной развязкой, установленный в звене постоянного напряжения;
- датчики тока *CD1*, *CD2*, установленные в двух выходных фазах инвертора;
- датчик температуры силового блока, состоящий из *NTC*-резистора, установленного в силовом модуле, и изолирующего усилителя (в преобразователях с выходным током 50 А и более датчики имеются в каждом из силовых модулей выпрямителя и инвертора);
- терморезистор защиты двигателя (*PTC*-резистор) со схемой компаратора и оптронной развязкой;
- инкрементальный датчик угловых перемещений, установленный на валу исполнительного двигателя.

Блок питания цепей управления преобразует выпрямленное сетевое напряжение в стабилизированное напряжение +5 В для питания цифровой части системы управления, +/–5 В для питания аналоговой части системы управления, +12 В для питания вентиляторов, изолированный источник +24 В для питания драйвера.

Система управления состоит из микропроцессорного ядра, интерфейсного модуля и пульта ручного управления.

Процессорное ядро образовано двумя 16-разрядными микроконтроллерами. Служебный контроллер (Host controller FUJITSU MB90F598) выполняет загрузку программ, обслуживание пульта ручного управления, коммуникационных портов, входных и выходных сигналов интерфейса, взаимодействует с контроллером управления двигателем, реализует "медленные" защиты. Контроллер управления двигателем (Motor controller ADMC401), выполненный на базе DSP, обрабатывает сигналы датчиковой системы, выполняет алгоритмы расчёта регуляторов, управляет силовым модулем и обслуживает "быстрые" защиты электропривода.

Интерфейсный модуль включает набор средств взаимодействия с внешними управляющими устройствами. Он состоит из аналогового интерфейса, цифрового интерфейса, таймера реального времени и интерфейса датчика скорости / положения.

Пульт ручного управления позволяет выполнять процедуры просмотра, редактирования параметров электропривода, запуска и контроля режимов его работы. В исполнениях с выносным пультом управления диагностика состояния электропривода дополнительно выполняется с помощью светодиодного индикатора на лицевой панели блока.

На упрощенной структурной схеме системы управления асинхронным электроприводом с датчиком скорости/положения (рис.2) показаны основные программно-реализованные блоки с параметрами, доступными для просмотра и редактирования с помощью пульта ручного управления или по каналу связи с внешним управляющим устройством.

Система адаптивно-векторного управления приводом синтезирована на основе уравнений динамики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, записанных относительно тока статора и потокосцепления ротора в синхронной ортогональной системе координат (*d*, *q*), ориентированной по вектору потокосцепления ротора.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

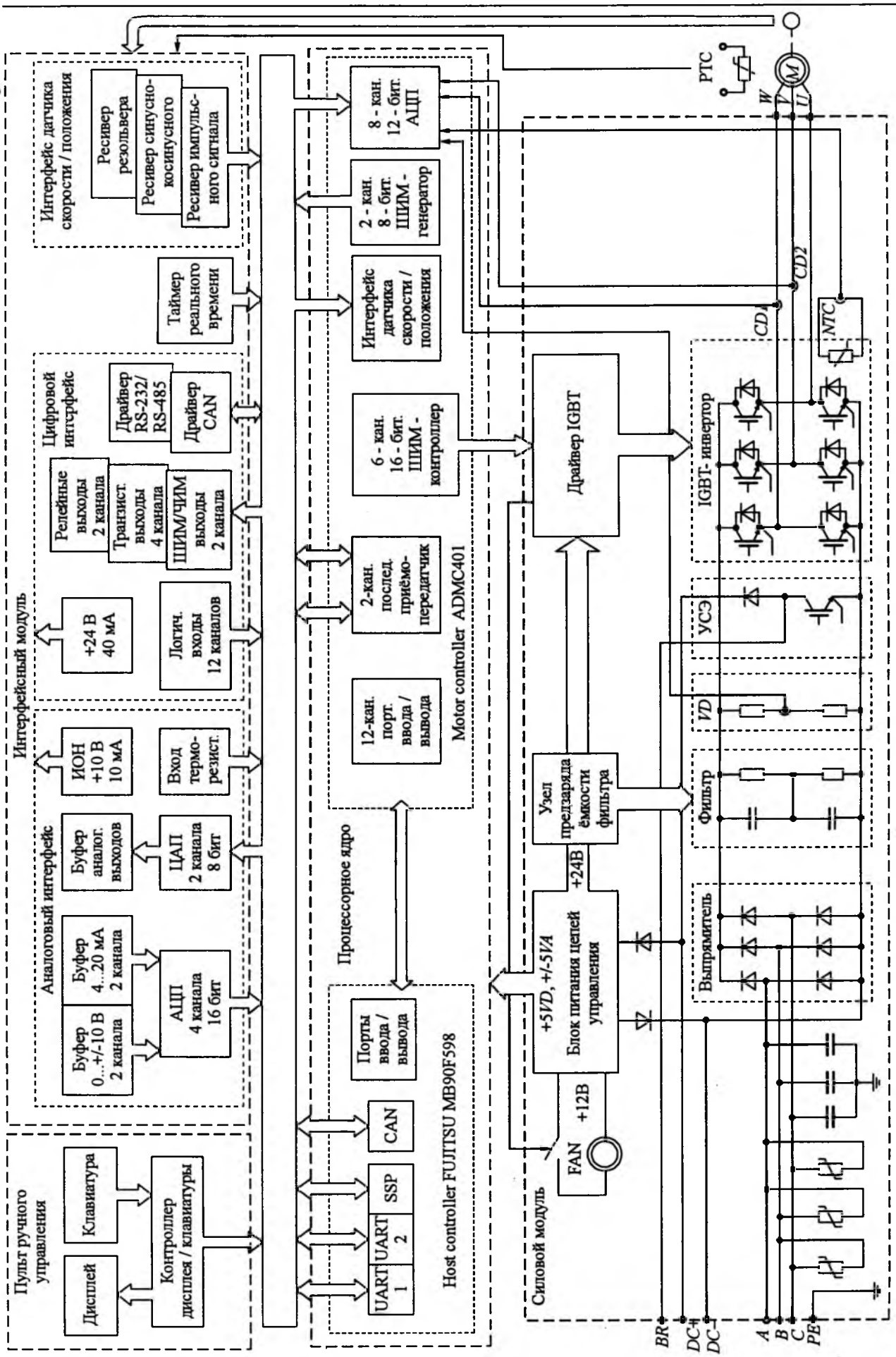


Рис.1. Функциональная схема электропривода

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

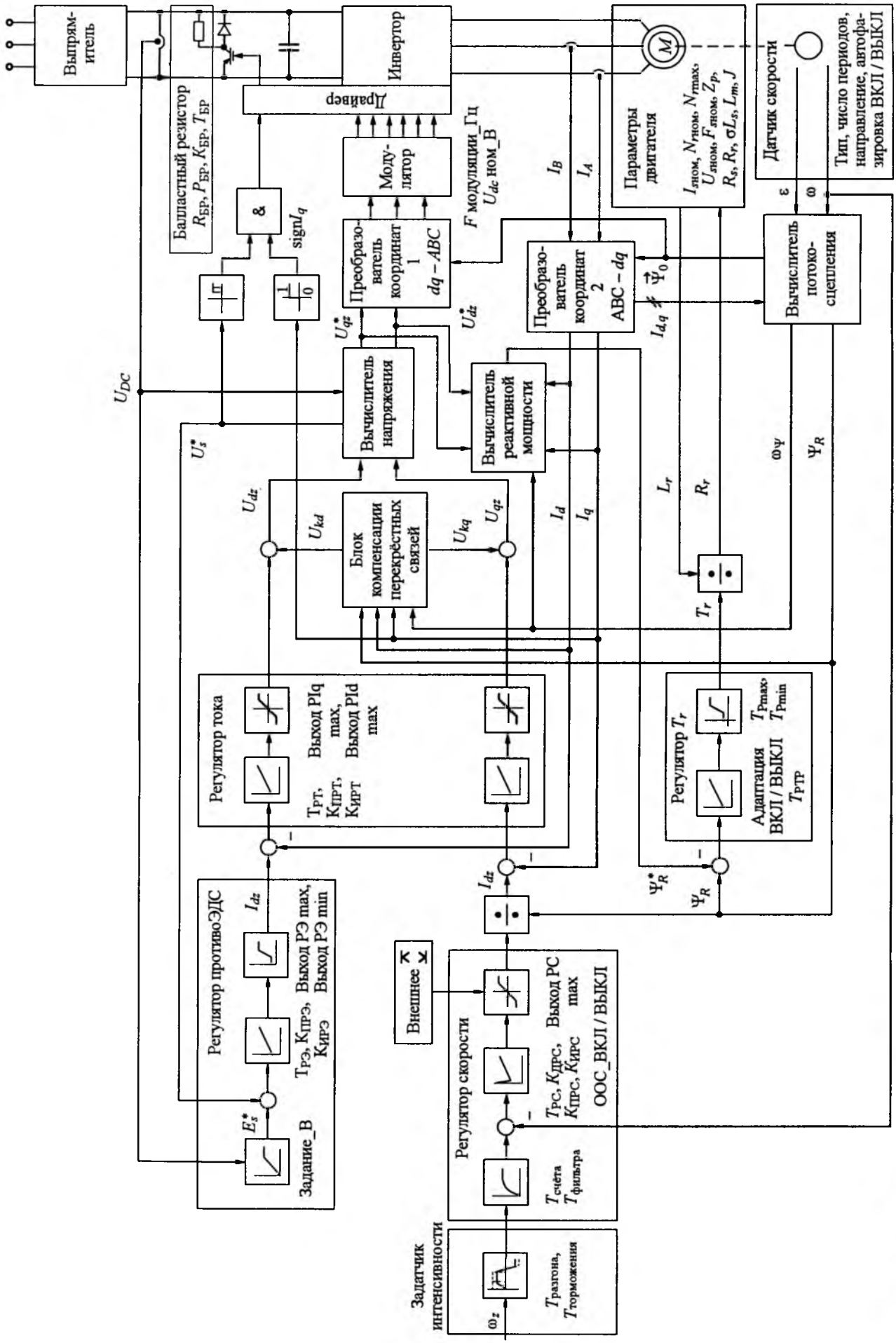


Рис.2. Структурная схема системы адаптивно-векторного управления асинхронным электроприводом с датчиком скорости/положения

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Это позволяет раздельно управлять потокосцеплением и электромагнитным моментом двигателя в каналах регулирования реактивной (I_d) и активной (I_q) составляющих тока статора.

Структура, параметры и алгоритмы работы регуляторов тока статора, скорости и противоЭДС синтезированы на основе принципов подчиненного регулирования с учётом дискретного характера процессов, с компенсацией влияния перекрестных связей и структурной линеаризацией контуров регулирования.

Регулятор скорости получает задание по скорости $\omega_з$, которое при необходимости может проходить через задатчик интенсивности и, оценивая информацию о реальной скорости ω, формирует задание активной составляющей тока статора. Параметром ОСС_ВКЛ / ВЫКЛ контур обратной связи по скорости может быть разомкнут и привод переводится в режим отработки задания по моменту.

Регулятор противоЭДС осуществляет формирование задания реактивной составляющей тока статора при работе привода в условиях ослабления поля при скорости двигателя, превышающей номинальную. В первой зоне регулирования скорости (вниз от номинальной) регулятор противоЭДС находится в насыщении: $I_{dз} = I_{dном} = \text{const}$ (где $I_{dном} = \Psi_{Rном} / L_m$; $\Psi_{Rном}$ – номинальное значение потокосцепления ротора). При отсутствии необходимого запаса по напряжению, создающего ресурс управления во второй зоне регулирования скорости, контур регулирования ЭДС заменяется контуром регулирования напряжения статора.

На выходе регулятора тока формируется задание вектора напряжения статора. Вычислитель напряжения, используя информацию с датчика в звене постоянного напряжения U_{DC}, определяет модуль задания вектора напряжения статора двигателя, реализует функции ограничения его максимального значения и компенсации запаздывания, вносимого системой управления.

Регулятор постоянной времени роторной цепи (РЕГУЛЯТОР T_r) производит адаптацию к температурным изменениям активного сопротивления ротора двигателя, происходящим в процессе работы электропривода.

Вектор потокосцепления ротора, его модуль Ψ_R, угловое положение и мгновенная частота вращения ω_Ψ вычисляются на основе информации о скорости ω, положении ротора ε и проекций вектора тока статора на оси d и q.

Преобразователь координат *2* (ABC → dq) выполняет преобразование фазных токов статора из естественной трёхфазной системы координат (A, B, C) в ортогональную синхронную систему координат (d, q).

Преобразователь координат *1* трансформирует вектор задания напряжения статора из синхронной системы координат в естественную (dq → ABC). Векторный модулятор преобразует его в импульсы управления ключами IGBT-инвертора, используя метод пространственно-векторного формирования напряжения [5] и реализует алгоритм компенсации ошибок, связанных с неидеальностью ключей инвертора [2].

Блок компенсации перекрестных связей формирует сигналы, компенсирующие влияние перекрёстных связей на процессы в контурах регулирования составляющих вектора тока статора.

Для управления узлом сброса энергии торможения показания датчика напряжения на конденсаторах фильтра U_{DC} сравниваются с пороговым значением. При этом оценивается знак активной составляющей вектора тока статора I_q. Таким образом, сигнал на подключение балластного резистора формируется только когда двигатель работает в генераторном режиме.

Преобразователи надёжно работают в условиях существенных отклонений параметров качества питающего напряжения (форма, колебания, перекосы, импульсные помехи и прочее), не требуя при этом обязательной установки дополнительных дорогостоящих фильтров. Однако там , где эти фильтры действительно необходимы по условиям электромагнитной совместимости оборудования, например, при большой длине соединительного кабеля между преобразователем и двигателем, электроприводы комплектуются фильтрами, специально разработанными НИЛ "Вектор" совместно с ООО "ЭЛПРИ" для работы с преобразователями серий ЭПВ и АПЧ. Подбор фильтров осуществляется в зависимости от частоты модуляции, типа, длины и способа укладки кабеля.

В составе комплектного электропривода преобразователи поставляются совместно с электродвигателями специального исполнения. По спецификации заказчика электродвигатели оснащаются независимой системой охлаждения, различными типами датчиков углового положения ротора, пристроенным электромагнитным тормозом.

Разработаны варианты специального исполне-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ния преобразователей частоты, предназначенные для работы в составе кранового и лифтового электропривода, комплектуемого электродвигателями специального исполнения, разработанными в ОАО "НИПТИЭМ". Эти исполнения преобразователей отличаются от ПЧ общепромышленного назначения:

– способностью формировать номинальный момент в состоянии покоя;

– улучшенными динамическими характеристиками;

– S-образным задатчиком интенсивности, обеспечивающим плавное (без рывков в начальных и конечных точках) разгон/торможение привода за счет сглаживания начальных и конечных участков характеристики разгона/торможения;

– способностью работать с асинхронными и синхронными двигателями с постоянными магнитами, в том числе с двигателями специального многополюсного исполнения, предназначенными для построения безредукторных электроприводов лифтов;

– наличием функции рекуперации энергии в питающую сеть при работе привода в тормозных режимах;

– реализацией векторных алгоритмов управления в исполнениях приводов с датчиком и без датчика скорости/положения;

– интерфейсом и конструктивным исполнением, адаптированными под конкретные условия применения.

В целом технические характеристики преобразователей серии ЭПВ и комплектных электроприводов на их основе не уступают, а по ряду параметров ± превосходят характеристики их зарубежных аналогов. При этом стоимость электроприводов в среднем на 15–50% меньше стоимости их зарубежных аналогов соответствующего технического уровня исполнения.

Список литературы

1. **Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н., Монов Д.А.** Асинхронный электропривод общепромышленного назначения с прямым цифровым управлением и развитыми интеллектуальными свойствами. // Изв. вузов. Электромеханика. 2001. № 3. С. 60–67.

2. **Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н.** Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. 2003. № 7. С. 7–17.

3. **Виноградов А.Б.** Цифровая релейно-векторная система управления асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими характеристиками // Электричество. 2003. № 6. С. 43–51.

4. **Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н. и др.** Новые серии многофункциональных векторных электроприводов переменного тока с универсальным микроконтроллерным ядром // Привод и управление. 2002. № 3. С. 5–10.

5. **Архангельский Н.Л., Чистосердов В.Л.** Формирование алгоритмов управления в частотно-управляемом электроприводе // Электротехника. 1994. № 3. С. 48–52.

Алгоритмы управления вентильно-индукторным электроприводом, обеспечивающие уменьшение неравномерности электромагнитного момента

ШАБАЕВ В.А., ЛАЗАРЕВ М.В., ЗАХАРОВ А.В.

Предлагаются алгоритмы управления вентильно-индукторным электроприводом, позволяющие снизить неравномерность электромагнитного момента, а также конструктивные и схемотехнические решения электромеханического и силового преобразователя, позволяющие уменьшить неравномерность потребления энергии с выхода звена постоянного тока вентильно-индукторного электропривода.

In this article a introduce the control algorithm of the switched-reluctance drive which let to reduce irregularity of the torque and also constructional and circuit solution of electromechanical and power converter which let to reduce irregularly of electric energy demand at the out less of direct current link of switched-reluctanse drive.

Современный этап развития промышленной автоматики характеризуется ускоренным обновлением технических средств управления. В связи с этим становятся актуальными задачи повышения технического уровня исполнительных устройств автоматики, в том числе вентильно-индукторных электроприводов (ВИП), которые отличаются высокой надёжностью, низкой стоимо-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

стью и высоким КПД, а также простой конструкцией и приемлемым уровнем утилизации электродвигательного элемента индукторной машины (ИМ). В настоящее время разработаны метод расчёта и моделирования ИМ и методики выбора параметров системы управления ВИП. Разработаны конструктивные, функциональные и схемотехнические решения элементов системы ВИП [1,2]. Однако до сих пор системы ВИП не нашли широкого применения в промышленных установках и на транспорте. На наш взгляд, одной из проблем, препятствующих широкому распространению ВИП в устройствах промышленной автоматики, является высокий уровень неравномерности электромагнитного момента, присущий ИМ. В ОАО "НИПТИЭМ" с 2002 г. ведутся работы по разработке конструкций ИМ и алгоритмов управления, компенсирующих неравномерность электромагнитного момента.

В статье рассмотрены конструктивные особенности ИМ и алгоритмы компенсации неравномерности электромагнитного момента ВИП, разработанные и апробированные нами в период с 2002 по 2004 гг. в рамках разработки электропривода трамвая.

Пульсация электромагнитного момента в ВИП могут быть вызваны различными причинами: функциональными особенностями; пульсациями в цепи питания; технологическими погрешностями и др. Однако наиболее существенными и наиболее устранимыми можно считать причины, обусловленные функциональными особенностями ИМ и пульсациями в цепи питания, вызванными неравномерным потреблением энергии с выхода звена постоянного тока [3].

В настоящее время известно два способа компенсации неравномерности электромагнитного момента:

– с помощью алгоритмов нелинейного токового управления, использующих специально подобранную токовую волну [4, 5];

– с помощью специальных регуляторов с применением обратных связей по электромагнитному моменту или производной частоты вращения [6].

Первый способ, исследование которого приведено в [4], основан на управлении четырёхфазной ИМ конструкции 8/6-фазным током, значение которого изменяется в пространстве по закону:

$$i_k = I_{\max}\sqrt{\sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{m}\right)},$$

где i_k – ток k-й фазы; $I_{\max}$ – максимальное значение тока фазы; γ – электрический угол; m – число фаз.

Электрический угол связан с механическим выражением:

$$\theta = \frac{\gamma(z_S - z_R)}{z_R},$$

где θ – механический угол; z_S – число зубцов статора; z_R – число зубцов ротора.

Следует отметить, что основной недостаток [4] заключается в том, что автор не учитывал влияние насыщения магнитной цепи на характер электромагнитного момента. Поэтому выводы о "нулевых пульсациях электромагнитного момента" несколько надуманы. Для такого двигателя нами были рассчитаны формы электромагнитного момента. В результате при учёте насыщения в зоне постоянства момента механической характеристики неравномерность момента, вычисляемая по формуле:

$$K_{\text{н}} = \frac{\Delta M_{\text{эм}}}{M_{\text{эм}}},$$

где $M_{\text{эм}}$ – значение электромагнитного момента двигателя; $\Delta M_{\text{эм}}$ – значение неравномерности электромагнитного момента, достигла значения $K_{\text{н}} = 15\%$.

Электромагнитный момент двигателя вычислялся в соответствии с энергетическим методом:

$$M_{\text{эм}} = \sum_{k=1}^{m} \left.\frac{\partial W_{k\text{м}}}{\partial \theta}\right|_{i_k = \text{const}},$$

где $W_{k\text{м}}$ – магнитная энергия, запасённая в k-й фазе.

Исследования были проведены для скошенного зуба статора, в результате было получено $K_{\text{н}} =$ = 7,8%, что является приемлемым для многих технических приложений.

Кроме того, нами был проведён анализ схем управления для такой ИМ. Анализ показал что выполнение функциональных требований при таком типе управления обеспечивает схема, показанная на рис.1.

Эта схема содержит восемь силовых полупроводниковых ключей и восемь диодов. Так как в настоящее время цена силовых полупроводниковых приборов ВИП является определяющей, то привод с ИМ 8/6 проигрывает по цене регулируемому электроприводу с асинхронным двигателем, в состав которого входят шесть силовых полупроводниковых приборов и шесть диодов.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

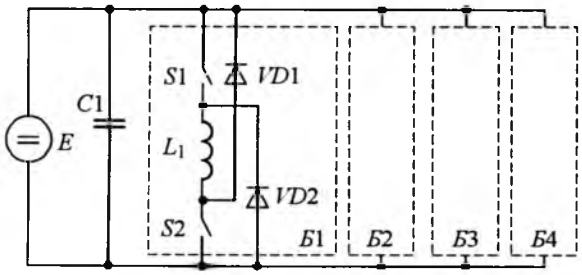


Рис.1. Силовая схема ВИП с нелинейным токовым управлением на основе ИМ 8/6

С учётом сказанного был разработан ВИП на основе шестифазной ИМ 12/10, силовая схема которого содержит шесть силовых полупроводниковых приборов и шесть ключей (рис.2).

Управление такого двигателя осуществляется током, формирующимся в соответствии с законом:

$$i_k = I_{\max} \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{m}\right).$$

При этом рассчитанные значения $K_н$ лежат в пределах от 0,9 до 10% (как в зоне постоянства момента, так и в зоне падения мощности механической характеристики). Результаты расчётов сведены в таблицу.

К достоинствам такого ВИП можно отнести равномерное потребление энергии с выхода звена постоянного тока, которое обеспечивается тем, что сумма токов в фазах шестифазной ИМ при использовании такого управления постоянна. Это позволяет свести к минимуму неравномерность момента, обусловленную пульсациями напряжения в цепи питания.

Следует отметить, что применение нелинейного токового управления в комплексе с ПИ-регулятором частоты вращения при специально подобранных коэффициентах передачи и постоянных времени позволяет снизить неравномерность момента ещё примерно в два раза.

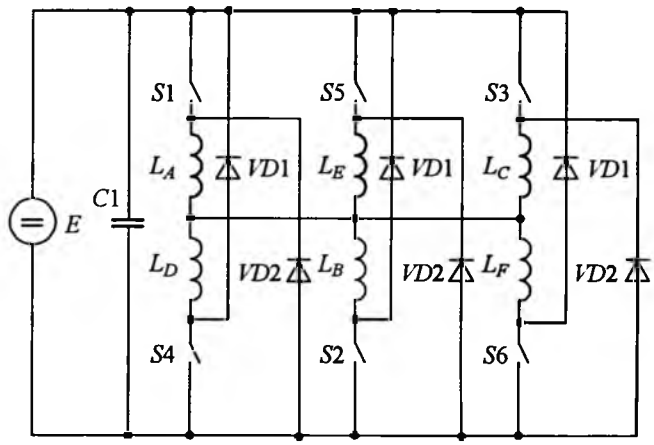


Рис.2. Силовая схема ВИП с нелинейным токовым управлением на основе ИМ 12/10

Таким образом, наиболее перспективным для использования в исполнительных устройствах автоматики и на транспорте, на наш взгляд, является вентильно-индукторный электропривод на основе шестифазной индукторной машины 12/10.

Вариант	l, мм	$D_{Sб}$, мм	h, мм	$S_м$, мм^2	n, об/мин	I_{max}, А	M, Н·м	P, кВт	$K_п$, %	КПД, %
1	240	220	48	760	10	250	600	0,63	0,9	17,4
					1500	230	510	80	4,5	95,3
					4000	97	123	52	4	94,1
2	240	240	38	683	10	250	600	0,64	1	15,9
					1500	225	506	80	4,5	95
					4000	103	133	56	5	94,5
3	240	260	28	564	10	250	610	0,64	1	13,3
					1500	220	800	80	4,5	94,5
					4000	109	143	60	5	94,5
4	360	220	48	760	10	250	600	0,63	3,5	24,6
					1500	222	510	80	7	95,7
					4000	165	216	90	10	95,4
5	360	240	38	683	10	250	730	0,76	2	21
					1500	175	510	800	5,7	95,9
					4000	120	148	62	5,5	94,8
6	360	260	28	564	10	250	800	0,83	1,6	20
					1500	170	506	800	9	96
					4000	105	125	53	5	94,5

Примечание: l – длина пакета; $D_{Sб}$ – диаметр расточки статора; h – высота зуба; $S_м$ – площадь сечения катушки; сталь 2212 толщиной 0,35 мм.

Список литературы

1. **Miller T.** Switched reluctance motors and their control. Oxford, 1993.

2. **Кузнецов В.А., Кузьмичёв В.А.** Вентильно-индукторные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 2003.

3. **Красовский А.Б.** Физические особенности и алгоритмы компенсации пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе // Состояние разработки и перспективы применения вентильно-индукторных приводов в промышленности и на транспорте: Материалы II Международной конференции. М., 2001. С.40–45.

4. **Dunlup G.** A switched-reluctance motor drive with zero torque ripple and a constant invertor bus current // Proceedings of the institution of Mechanical Engineers. 1995. Vol. 208, № 1. P.61–68.

5. **Sahoo N.C., Xu J.X. at al.** Determination of current waveforms for torque ripple minimization is switched reluctance motors using iterative an investigation // IEE Proc. EPA. 1999. Vol.146, № 4. C.369–377.

6. **Nubuki M., Norihiko A et al.** High precision torque control of reluctance motor // Conference record IEEE industrial application. New York, 1989. P. 390–397.

7. **Шабаев В.А., Захаров А.В.** Экспериментальное исследование двухфазных нереверсивных вентильно-индукторных двигателей // Электротехника. 2003. № 2. С.44–47.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Учёт потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе

ВИНОГРАДОВ А.Б.

Рассмотрены основные результаты разработки динамических моделей асинхронного двигателя, питаемого от преобразователя частоты, с учётом потерь в стали от гистерезиса и вихревых токов, насыщения участков магнитной системы двигателя основным магнитным потоком и потоками рассеяния, эффекта вытеснения тока в стержнях короткозамкнутой обмотки ротора.

The dynamic models basic development results of induction motor fed by frequency converter are presented with regard of iron losses from hysteresis and eddy currents, saturation of magnetic system by the main and leakage magnetic fluxes, skin effect in squirrel-caged rotor winding.

Для исследования динамики асинхронного двигателя (АД) и решения задач синтеза динамических режимов асинхронного электропривода наиболее часто применяются математические модели на основе уравнений Парка–Горева [1], не учитывающие потери в стали, эффекты насыщения магнитной системы и вытеснения тока в стержнях ротора. В некоторых режимах это приводит к существенным количественным и качественным отклонениям расчётных динамических и статических характеристик привода от реальных. Учёт каждого из этих эффектов в отдельности и, тем более, их совместное рассмотрение сопряжено со значительными трудностями, среди которых: проблема определения параметров модели, сложные зависимости параметров от переменных привода (токов, потокосцеплений, частоты токов статора и ротора); существенное усложнение системы уравнений и алгоритмов расчёта. Известные математические модели либо учитывают только часть этих эффектов, например, насыщение цепи намагничивания, либо настолько сложны, что плохо подходят для применения в задачах анализа и синтеза динамических процессов в асинхронном электроприводе, в частности, в электроприводе с преобразователями частоты. Особенно это проявляется при решении задач анализа и синтеза динамических процессов в реальном времени работы электропривода.

Важность задачи учёта потерь в стали по крайней мере при работе АД с нагрузками, не превышающими номинальную, определяется существенным вкладом этих потерь в суммарные потери машины. Так, для АД серии 4А потери в стали могут составлять более 20% полных потерь номинального режима и более 50% полных потерь XX. Неучёт этих потерь при анализе энергетических характеристик привода приводит к существенным погрешностям.

Небольшое влияние потери в стали оказывают также на значения и взаимную ориентацию обобщённых векторов электромагнитных переменных АД (напряжения, токов, потокосцеплений) в статических и динамических режимах работы.

В статье рассматриваются основные результаты разработки динамических моделей асинхронного двигателя, питаемого от преобразователя частоты, с учётом потерь в стали от гистерезиса и вихревых токов, насыщения участков магнитной системы двигателя основным магнитным потоком и потоками рассеяния, эффекта вытеснения тока в стержнях короткозамкнутой обмотки ротора. Основные требования к модели: динамическая модель должна быть адекватна реальному объекту в рабочих диапазонах изменения всех его переменных; иметь минимальное количество дифференциальных уравнений; все параметры модели должны быть либо константами, либо функциями одной из переменных состояния; количество параметров модели, изменяющихся в зависимости от режима работы двигателя должно быть минимальным; алгоритм расчёта процессов по возможности должен быть прямым, т.е. не допускающим итераций.

При разработке модели были приняты следующие допущения:

1) частота основной гармоники и частота модуляции выходного напряжения преобразователя разнесены таким образом, что "медленные" процессы могут рассматриваться независимо от "быстрых";

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

2) имеется симметрия электрических и магнитных цепей двигателя;

3) потери в стали ротора пренебрежимо малы относительно других видов потерь;

4) эффект насыщения магнитной системы основным магнитным потоком и потоками рассеяния, а также эффект вытеснения тока в роторе учитываются зависимостями параметров АД от его переменных, полученными в установившихся режимах работы;

5) пренебрегаем влиянием гистерезиса стали на форму токов и потокосцеплений двигателя.

Характер изменения переменных и параметров АД в различных статических режимах работы частотно-регулируемого электропривода был исследован с помощью уточненной модели, построенной на основе известных [2,3] методов расчёта и проектирования АД с учётом его конструктивных параметров и адаптации методов под задачи частотного управления. Показатели точности расчёта параметров и переменных АД этими методами относительно экспериментальных данных, получаемых на реальных объектах, хорошо известны из теории электрических машин. В качестве примера использования данной модели для расчёта параметров АД на рис.1 представлены зависимости активного сопротивления (R_r) и индуктивности рассеяния ротора ($L_{\sigma r}$)от частоты тока ротора (рис.1,*а*), зависимости индуктивностей рассеяния статора ($L_{\sigma s}$) и ротора от тока статора (рис. 1, *б*) и зависимость индуктивности взаимоиндукции (L_m)от потокосцепления взаимоиндукции для двигателя 4А250S4У3 мощностью 75 кВт.

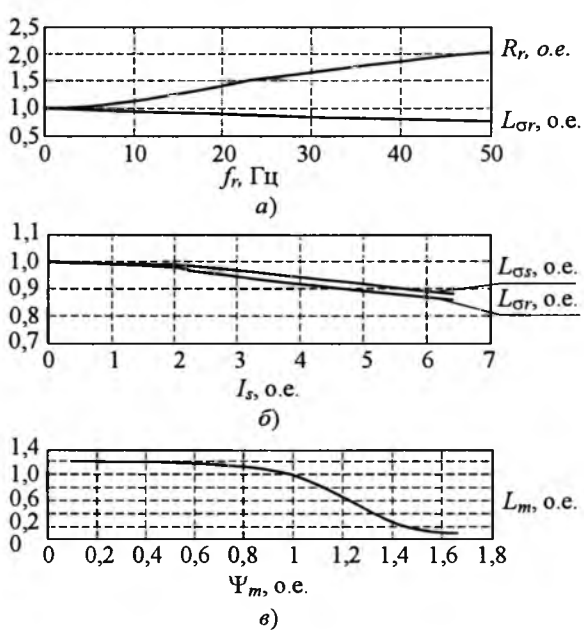


Рис.1. Зависимости параметров асинхронного двигателя 4А250S4У3 от его переменных

В качестве базовых значений переменных и параметров здесь приняты: номинальное значение тока статора; потокосцепление взаимоиндукции, полученное в режиме ХХ при номинальных значениях напряжения и частоты статора; активное сопротивление ротора, индуктивности рассеяния статора и ротора, полученные в режиме ХХ.

Из анализа зависимостей видно, что в распространённом частном случае частотного и векторного управления АД с ограниченными значениями частоты тока ротора (для указанного двигателя $f_r < 5$ Гц) и перегрузочной способности преобразователя по току на уровне $I_{max} \le 2I_{ном}$ параметры R_r, $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma r}$ могут быть с высокой степенью точности приняты постоянными. В случае, если при управлении АД его потокосцепление изменяется в широких пределах, неучёт изменения индуктивности взаимоиндукции будет приводить к существенным погрешностям в расчётах.

Предлагаемый метод учёта потерь в стали для исследования динамических процессов в частотно-управляемом электроприводе основан на разделении составляющих потерь на потери от гистерезиса и вихревых токов. Дополнительно примем следующие допущения: суммарные потери от гистерезиса пропорциональны квадрату потокосцепления взаимоиндукции и частоте основной гармоники поля; суммарные потери от вихревых токов пропорциональны квадрату потокосцепления взаимоиндукции и квадрату частоты. Эти допущения позволяют описать потери в стали с помощью введения в динамическую модель двигателя двух постоянных коэффициентов: коэффициента потерь от вихревых токов R_{ec} (Ом), коэффициента потерь от гистерезиса k_h (Гн).

Оценка грубости таких допущений была выполнена для ряда типоисполнений АД серии 4А. В качестве эталона взята уточненная модель АД, выполненная с учётом его конструктивных параметров, принимаемых при проектировании асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по методике, изложенной в [2]. Исследования показали, что в диапазоне частот $(0,1–2)\,f_{ном}$ погрешность оценки потерь в стали при дополнительно принятых допущениях относительно их значений, полученных на уточненной модели АД, не превышает 2%. При этом определение коэффициентов R_{ec}, k_h для конкретного типа двигателя осуществляется по значениям потерь в стали

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

(рассчитанным или экспериментально определённым по известным методикам) в двух точках рабочего диапазона частот в режиме ХХ двигателя.

Уравнения, описывающие динамические процессы в АД с учётом потерь в стали и насыщения цепи намагничивания, запишем в векторной форме в системе координат, вращающейся с произвольной частотой ω_k [9]:

$$\left.\begin{aligned}
&\vec{U}_s = R_s\vec{I}_s + L_{\sigma s}\frac{d\vec{I}_s}{dt} + \frac{d\vec{\Psi}_m}{dt} + j\omega_k\vec{\Psi}_s;\\
&0 = R_r\vec{I}_r + L_{\sigma r}\frac{d\vec{I}_r}{dt} + \frac{d\vec{\Psi}_m}{dt} + j(\omega_k - \omega_{re})\vec{\Psi}_r;\\
&0 = R_{ec}\vec{I}_{ec} + L_{ec}\frac{d\vec{I}_{ec}}{dt} + \frac{d\vec{\Psi}_m}{dt} + j\omega_k\vec{\Psi}_{ec};\\
&\vec{\Psi}_s = L_{\sigma s}\vec{I}_s + \vec{\Psi}_m;\ \vec{\Psi}_r = L_{\sigma r}\vec{I}_r + \vec{\Psi}_m;\\
&\vec{\Psi}_{ec} = L_{ec}\vec{I}_{ec} + \vec{\Psi}_m;\\
&\vec{\Psi}_m = L_m(I_m)\vec{I}_m;\ \vec{I}_m = \vec{I}_s + \vec{I}_r + \vec{I}_{ec} - j\frac{\vec{\Psi}_m}{k_h};
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$M = \frac{3}{2}z_p(\vec{I}_r \times \vec{\Psi}_m);\ \frac{d\omega_{re}}{dt} = \frac{z_p}{J}(M - M_c), \quad (2)$$

где $\vec{U}_s$ – вектор напряжения статора; $\vec{I}_s, \vec{I}_r, \vec{I}_m$, $\vec{\Psi}_s, \vec{\Psi}_r, \vec{\Psi}_m$ – векторы токов и потокосцеплений статора, взаимоиндукции; $\vec{I}_{ec}, \vec{\Psi}_{ec}$ – векторы тока и потокосцепления эквивалентного контура, учитывающего потери в стали от вихревых токов; L_{ec} – индуктивность контура потерь в стали от вихревых токов; R_s – активное сопротивление фазы статора; z_p – число пар полюсов; J – момент инерции; $\omega_{re} = z_p\omega_r$ частота вращения ротора электрическая; ω_r – частота вращения ротора механическая.

Соответствующая схема замещения АД представлена на рис.2. Потери в стали от гистерезиса учитываются дополнительной составляющей $\vec{I}_h = j\frac{\vec{\Psi}_m}{k_h}$, формирующей фазовое запаздывание потокосцепления взаимоиндукции от результирующего тока магнитной цепи $\vec{I}_{00} = \vec{I}_m + \vec{I}_h - \vec{I}_{ec}$. При этом полагаем, что гистерезис влияет только на фазу тока и не влияет на его форму. Для магнитомягких материалов сердечников это допущение не является грубым. Строго говоря, такой подход справедлив для установившихся режимов работы двигателя, но с высокой степенью достоверности он может быть распространён и на динамические режимы.

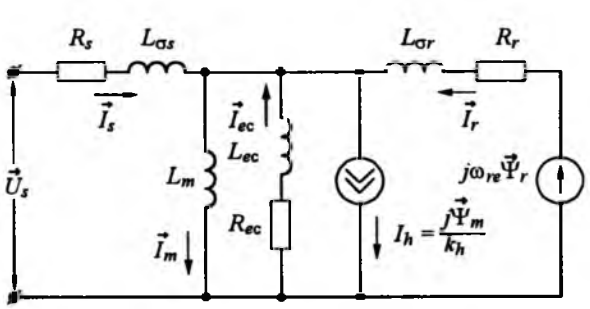


Рис.2. Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя с учётом потерь в стали

Анализ соотношения параметров представленной модели АД показывает, что постоянная времени эквивалентного контура вихревых токов много меньше остальных электромагнитных постоянных времени. Это позволяет пренебречь влиянием динамики контура вихревых токов на электромагнитные динамические процессы двигателя. В связи с этим рассмотрим важный частный случай, когда влияние вихревых токов учитывается только одним активным сопротивлением R_{ec}. С учётом условия $L_{ec} = 0$ после преобразования (1) и записи уравнений относительно $\vec{I}_s, \vec{I}_r, \vec{\Psi}_m$ получим:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{d\vec{I}_s}{dt} = \frac{1}{L_{\sigma s}}\left(-(R_s + R_{ec} + j\omega_k L_{\sigma s})\vec{I}_s - R_{ec}\vec{I}_r + \right.\\
&\left. + \left(\frac{R_{ec}}{L_m(\Psi_m)} + j\frac{R_{ec}}{k_h}\right)\vec{\Psi}_m + \vec{U}_s \right);\\
&\frac{d\vec{I}_r}{dt} = \frac{1}{L_{\sigma r}}\left(-R_{ec}\vec{I}_s - (R_r + R_{ec} + j(\omega_k - \right.\\
&\left. - \omega_{re})L_{\sigma r})\vec{I}_r + \left(\frac{R_{ec}}{L_m(\Psi_m)} + j\left(\frac{R_{ec}}{k_h} + \omega_{re}\right)\right)\vec{\Psi}_m \right);\\
&\frac{d\vec{\Psi}_m}{dt} = R_{ec}\left(\vec{I}_s + \vec{I}_r - \left(\frac{1}{L_m(\Psi_m)} - j\frac{1}{k_h}\right)\vec{\Psi}_m \right) -\\
&- j\omega_k\vec{\Psi}_m,
\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

где Ψ_m – модуль вектора потокосцепления взаимоиндукции.

Уравнения (2), (3) образуют систему уравнений, удобную для расчёта динамических процессов в частотно-управляемом АД с учётом потерь в стали и насыщения цепи намагничивания. При

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

выборе ортогональной двухфазной системы координат получим систему из семи дифференциальных уравнений. Расчёт может выполняться одним из численных методов приближённого интегрирования. Шаг интегрирования выбирается из условия:

$$T_и \le \min\{T'_s, T'_r\}, \qquad (4)$$

где

$$T'_s = \frac{L_{\sigma s}}{R_s + R_{ec}}; \quad T'_r = \frac{L_{\sigma r}}{R_r + R_{ec}}.$$

Так как шаг интегрирования, выбранный из условия (4), достаточно мал, а потокосцепление взаимоиндукции представляет собой относительно медленно изменяющуюся переменную (в сравнении с напряжением и токами статора и ротора), то с высокой точностью можно принять допущение $\Psi_m^k = \Psi_m^{k-1}$, где Ψ_m^k, Ψ_m^{k-1} – модули вектора потокосцепления взаимоиндукции на соседних шагах расчёта.

В результате алгоритм расчёта уравнений математической модели становится безытерационным.

В случае отсутствия симметрии в питающих напряжениях и независимом питании статорных обмоток систему уравнений (2), (3) нужно дополнить уравнением тока статора нулевой последовательности фаз [1,4].

Если в рабочих режимах электропривода частота тока ротора и амплитуда тока статора выходят за пределы установленных ограничений, для адекватного описания динамических процессов в системе уравнений учитываются статические зависимости $R_r(f_r)$, $L_{\sigma r}(f_r)$, $L_{\sigma s}(I_s)$, $L_{\sigma r}(I_s)$, полученные на уточнённой модели АД с учётом его конструкции.

В качестве иллюстрации работы модели на рис.3,*а* приведены временны́е диаграммы электромагнитного момента и скорости двигателя 4А250S4У3 мощностью 75 кВт в режиме прямого пуска без нагрузки. Для сравнения на рис.3,*б* изображены временны́е диаграммы, которые были получены на традиционной модели Парка–Горева с постоянными значениями параметров, взятыми для номинального режима работы двигателя. Существенные отличия главным образом определяются влиянием эффектов вытеснения тока ротора, насыщения магнитной системы основным магнитным потоком и потоками рассеяния.

Коэффициенты потерь в стали от вихревых токов и гистерезиса рассчитываются на основе

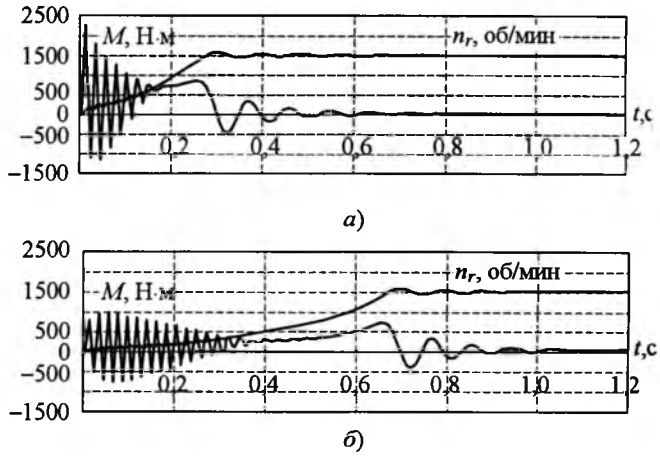


Рис.3. Временны́е диаграммы прямого пуска АД 4А250S4У3, полученные на уточнённой динамической модели (*а*) и на традиционной модели Парка–Горева (*б*)

конструктивных параметров двигателя или находятся экспериментально. В простейшем случае для этого достаточно определить потери в стали в двух точках частотного диапазона при работе двигателя в режиме ХХ с напряжением, формируемым по закону:

$$\frac{U_s}{f} = (0{,}5 \div 1)\frac{U_{s\text{ном}}}{f_{\text{ном}}}.$$

С целью повышения точности данного способа оценки коэффициентов потерь частота напряжения в точках измерения выбирается таким образом, чтобы частотный отрезок между точками измерения перекрывал значительную часть либо весь диапазон рабочих частот электропривода. Расчёт коэффициентов потерь выполняется с помощью решения системы из двух алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{1}{R_{ec}} + \dfrac{1}{2\pi f_1 k_h} = \dfrac{1}{R_{m1}}; \\ \dfrac{1}{R_{ec}} + \dfrac{1}{2\pi f_2 k_h} = \dfrac{1}{R_{m2}}, \end{cases}$$

где f_1, f_2 – частоты, при которых производятся измерения; R_{m1}, R_{m2} – сопротивления, совокупно учитывающие потери в стали от вихревых токов и гистерезиса на частотах f_1, f_2, включённые параллельно контуру намагничивания традиционной Т-образной схемы замещения фазы АД [2,3].

С потерями в стали параметры связаны следующим выражением:

$$P_c = P_{ec} + P_h = \frac{E_m^2 m}{R_{ec}} + \frac{E_m^2 m}{2\pi f k_h} = \frac{E_m^2 m}{R_m},$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где P_{ec}, P_h, P_c – потери в стали от вихревых токов, от гистерезиса, суммарные; m – число фаз АД; E_m – ЭДС взаимоиндукции.

Строго говоря, для вычисления потерь от гистерезиса должна использоваться не вся ЭДС взаимоиндукции $\bar{E}_m = d\bar{\Psi}_m/dt$, а только одна её составляющая: $j\omega_\Psi \bar{\Psi}_m$, представляющая собой ЭДС вращения вектора потокосцепления взаимоиндукции. Так как другая, трансформаторная часть ЭДС $(d\bar{\Psi}_m/dt)\bar{\Psi}_m^0$, которая появляется в динамических режимах, сопровождаемых изменением модуля потокосцепления, обычно мала по отношению к ЭДС вращения в рабочих режимах привода, то такое допущение не является грубым. Ψ_m, $\bar{\Psi}_m^0$, ω_Ψ – модуль, единичный направляющий вектор и частота вращения вектора потокосцепления взаимоиндукции.

Если измерения потерь в стали (расчёт сопротивлений R_m, учитывающих потери в стали) произведены в нескольких точках частотного диапазона электропривода, то коэффициенты потерь от гистерезиса и вихревых токов вычисляются на основе минимизации среднеквадратического значения относительной погрешности потерь или расчётных сопротивлений R_m. Для АД 4А250S4УЗ получены следующие значения коэффициентов потерь: R_{ec} = 288 Ом, k_h = 0,706 Гн.

Представленная модель может использоваться для адекватного описания динамических процессов в асинхронном электроприводе с управлением от преобразователя частоты во всех типовых режимах регулирования переменных. За счёт учёта потерь в стали модель позволяет осуществлять точный анализ энергетических характеристик привода как в статике, так и в динамике. С учётом ограничений на частоту тока ротора и амплитуду тока статора упрощённая версия модели может использоваться для решения задач синтеза системы управления электроприводом. Модель была апробирована в составе модели асинхронного электропривода с частотным и векторным управлением. Достигнута хорошая сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке. Лабораторная установка включает асинхронный двигатель 4А112МА6УЗ мощностью 3 кВт, преобразователь частоты серии ЭПВ [10], реализующий как частотное, так и векторное управление электроприводом, нагрузочный агрегат и контрольно-измерительную аппаратуру. Все необходимые для построения модели параметры определяются в процессе автоматической настройки привода на параметры подключенного двигателя [11].

Выводы

1. Разработана динамическая модель асинхронного двигателя, питаемого от преобразователя частоты, с учётом потерь в стали от гистерезиса и вихревых токов, насыщения участков магнитной системы двигателя основным магнитным потоком и потоками рассеяния, эффекта вытеснения тока в стержнях короткозамкнутой обмотки ротора.

2. Динамическая модель адекватна реальному объекту в рабочих диапазонах изменения всех его переменных, имеет минимальное количество дифференциальных уравнений; все параметры модели представляют собой константы либо функции одной из переменных; алгоритм расчёта процессов безытерационный.

3. Все параметры рассчитываются на основе конструктивных параметров машины либо определяются экспериментально. При этом эксперимент поддаётся полной автоматизации в лабораторных условиях.

4. Модель может использоваться как для решения задач анализа, так и для синтеза динамических процессов в асинхронном электроприводе с управлением от преобразователя частоты, формирующего на своём выходе напряжение с частотой модуляции, существенно (как минимум на порядок) превосходящей частоту основной гармоники переменных, что позволяет рассматривать "медленные" процессы независимо от "быстрых".

Список литературы

1. **Ковач К.П., Рац И.** Переходные процессы в машинах переменного тока. М. -Л.: Госэнергоиздат, 1963.

2. **Проектирование** электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. Кн.1. М.: Энергоатомиздат, 1993.

3. **Домбровский В.В., Зайчик В.М.** Асинхронные машины: Теория, расчёт, элементы проектирования. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.

4. **Шрейнер Р.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000.

5. **Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н. и др.** Новые серии многофункциональных векторных электроприводов переменного тока с универсальным микроконтроллерным ядром // Привод и управление. 2002. № 3. С.5–10.

6. **Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н.** Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. 2003. № 7. С.7–17.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Анализ источников шума вентильно-индукторного двигателя

ШАБАЕВ В.А.

Рассмотрены пять источников шума вентильно-индукторного двигателя, определены методы снижения шума.

In this article a introduce five noise sources of the switched-reluctance motor and defined the methods of noise reducing.

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) в настоящее время вызывают всё больший интерес разработчиков благодаря высокому КПД, простоте конструкции, высокой надёжности.

Однако на наш взгляд широкому распространению ВИД в настоящее время препятствует ряд недостатков, присущих этому двигателю. Один из основных недостатков ВИД – высокий уровень шумов.

Наиболее интересной работой, посвящённой природе шумов ВИД является [1]. К сожалению, эта работа чисто экспериментальная, и метод уменьшения шумов, предложенный авторами, трудно осуществим. В [1] совершенно справедливо показано, что статор ВИД – резонансное звено с распределёнными параметрами, в котором могут возникать ударные механические колебания при разрыве производной изменения индуктивностей по углу поворота ротора, при разрывах производных тока по углу поворота ротора и при наличии в токовом сигнале гармоник тока, близких к резонансной частоте статора. Авторы предлагают фактически ввести в управление двигателем электрическое демпферное устройство и изменять амплитуду тока в противофазе механических колебаний ротора. Однако это решает проблему шума частично. Во-первых, сила притяжения статора к ротору является не только функцией угла поворота ротора и угла включения и выключения тока, но и амплитуды тока. Во-вторых, этот метод не позволяет полностью устранить шумы, возникающие от резонанса колебаний статора. В-третьих, для электрического демпфирования необходим датчик прогиба статора или микрофон. В-четвёртых, наличие гармонических составляющих тока в обмотках двигателя и в потоке статора и ротора увеличивает потери и уменьшает КПД.

На самом деле источников шума в ВИД гораздо больше, чем показано в [1]. Так как ВИД работает при больших индукциях в зазоре и в «железе» статора и ротора, то у него ярче выражается магнитострикционный эффект, т.е. эффект изменения геометрических размеров «железа» при намагничивании. На рис.1. показан сердечник с ферромагнитным материалом с обмоткой. При наличии тока в обмотке в сердечнике возникает магнитное поле с индукцией B, которое вызывает усилие, сжимающее сердечник с силой F. При этом длина сердечника уменьшается, а его ширина – увеличивается.

Поскольку сила зависит от квадрата индукции, то усилие, прикладываемое к сердечнику, нелинейно возрастает по мере увеличения индукции. Кроме того, всегда работают на сжатие, т.е. не зависят от направления потока или тока. При большой индукции, которая наблюдается особенно в зубцах ВИД, и частоте коммутации тока, лежащей в звуковой области, из-за изменения геометрических размеров сердечник начинает «звенеть».

Уменьшить этот эффект за счёт упрочнения «железа» не представляется возможным, так как прочностные параметры не являются определяющими при конструировании ВИД.

Значительно более важными являются характеристики электротехнической стали. Желательно материал сердечника выбирать с максимальной магнитной проницаемостью и резким насыщением, при этом в номинальном режиме рабочая точка характеристики намагничивания должна располагаться в точке перегиба характеристики намагничивания.

Вторым источником являются шумы, возникающие за счёт периодической деформации обмотки, возникающей при протекании тока. На рис.2 показаны магнитные силовые линии сосредоточенной обмотки ВИД. Из рис.2 видно, что на прямых участках силовые магнитные линии распределены равномерно, а в лобовых частях количество силовых магнитных линий на длину l_1 меньше, чем на l_2 из-за того, что внутренний радиус катушки меньше, чем внешний. Так как магнитные силовые линии имеют свойство отталкиваться друг от друга, то любая катушка при протекании тока стремится превратиться в кольцо, в котором густота магнитных линий равномерна.

Поскольку обмотка имеет определённую массу и упругость, то она может быть представлена, как колебательное звено (по крайней мере, второго порядка с распределёнными параметрами и с определённым коэффициентом демпфирования), которое может

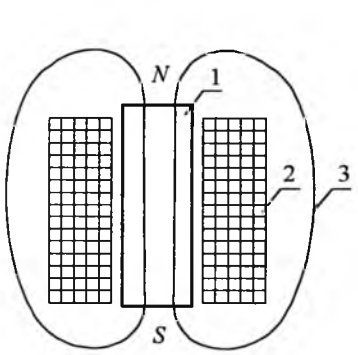


Рис.1

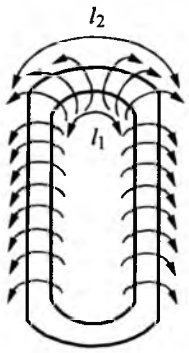


Рис.2

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

войти в резонанс с первой или более высокими гармониками тока и вызвать резкое увеличение шумов. Пути борьбы с шумами, вызываемыми деформацией катушки, увеличение частоты резонанса и повышение коэффициента относительного демпфирования, а также отсутствие гармоник тока, близких по частоте к резонансной частоте катушки.

Следует отметить, что в электродвигателях с распределёнными обмотками (двухфазных, трёхфазных и т. д.) этот эффект почти полностью отсутствует, так как геометрическая сумма токов в лобовых частях равна нулю, т.е. лобовые части традиционных двигателей переменного тока (асинхронных и вентильных) не создают поток, однако омическое сопротивление в лобовых частях и потери присутствуют. Поэтому с точки зрения омических потерь выгодно двигатель с распределёнными обмотками увеличить в длину. Лобовые части обмоток ВИД создают магнитный поток, при этом омическое сопротивление пропорционально длине витков, а поток определяется их площадью. Наименьшей длиной периметра при наибольшей площади, ограниченной этим параметром, обладает круг. Однако в традиционных конструкциях ВИД выполнить обмотки круглыми затруднительно. Из прямоугольных фигур наибольшей площадью при наименьшем периметре обладает квадрат, поэтому с точки зрения омических потерь лучшее сечение полюса статора квадратное, а ВИД – плоский.

Третьим источником шумов является деформация зубцов ротора и статора, возникающая в том случае, когда двигатель развивает момент. При этом зубец статора и зубец ротора обладают определённой упругостью и массой и могут быть описаны колебательным звеном второго порядка.

В ОАО «НИПТИЭМ» проведены расчёты, позволяющие сделать вывод, что зона местного магнитного насыщения имеет максимальную глубину, когда полюса статора и ротора перекрываются наполовину. При этом получается, что минимальная высота полюса ротора и статора равна половине ширины полюса ротора и статора. Однако отношение ширины полюса статора к его длине определяется полюсностью статора и количеством «меди», поэтому для уменьшения деформации статора необходимо применение жёстких клиньев и компаундирование обмоток. Для увеличения жёсткости зубцов ротора можно порекомендовать сделать форму впадины закруглённой.

Четвёртым источником шума являются силы отталкивания, возникающие в шихтованном магнитопроводе за счёт намагничивания отдельных пластин ротора и статора.

Каждую из пластин можно представить как совокупность элементарных магнитов, имеющих свои потоки рассеивания. При взаимодействии этих потоков возникают силы, отталкивающие пластины друг от друга. Это явление можно уменьшить склеиванием пластин или если сделать статор и ротор не шихтованным, что вполне возможно в специальных двигателях, имеющих очень малые частоты вращения.

Пятым и, по-видимому, основным источником шума является притяжение ротора к статору. В двигателях с распределённой обмоткой притяжение ротора к статору распределено по синусоидальному закону. В отличие от двигателей с распределёнными обмотками ВИД имеют сосредоточенные обмотки и явно выраженные полюса.

В трёхфазном и четырёхфазном ВИД ток протекает по одной или двум обмоткам полюсов, но в трёхфазном ВИД коэффициент перекрытия соседних фаз по току составляет 1/2, а в четырёхфазном – угол протекания тока по одной фазе равен нулю.

Таким образом, в отличии от двигателей с распределённой обмоткой, в которых силы притяжения ротора к статору не распределены по статору, а сосредоточены в полюсах статора, причём в притяжении ротора к статору участвуют одновременно, в ВИД

$$n_{\text{п.р}} = \frac{n_{\text{п.ст}}}{2}, \qquad (1)$$

где $n_{\text{п.р}}$ – число полюсов статора, притягивающих ротор; $n_{\text{п.ст}}$ – число полюсов статора.

Таким образом, силы притяжения ротора к статору создают в трёхфазном двигателе 1,5 пары полюсов, в четырёхфазном – 2 пары полюсов, в шести фазном – 3 пары полюсов. При увеличении общего числа пар полюсов число полюсов, притягивающих ротор к статору, растёт пропорционально числу пар полюсов. В этом смысле интересно сравнить трёхфазный двигатель с двумя парами полюсов 12/8 (с восемью полюсами на роторе и 12 полюсами на статоре) с шестифазным двигателем 12/10 (с десятью полюсами на роторе и двенадцатью полюсами на статоре).

Согласно выражению (1) число пар полюсов, участвующих в создании сил притяжения, у двигателя 12/8 составит 3, у двигателя 12/10 также 3, однако силы, действующие на статор, распределяются по поверхности статора более равномерно поэтому при увеличении числа пар полюсов двигатель становится менее шумным.

В [1] показано, что ротор ВИД жёсткий и при притяжении происходит деформация только статора. Однако, если учесть, что точность изготовления ротора и статора конечная, то в любом двигателе присутствуют несоосности и перекосы осей ротора и статора. Поэтому возможно возникновение несимметрии зазора и, как следствие, силы одностороннего притяжения. В этом случае податливость вала и подшипников также начинает влиять на шумы двигателя.

Таким образом, в ВИД присутствуют пять источников шумов. Все эти источники описываются резонансными звеньями не ниже второго порядка, в которых могут возникать как ударные колебания при разрывах производных возмущающих или управляющих воздействий, так и резонансные явления по первой или высшим гармоникам. При этом управляющим

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

воздействием является напряжение, подаваемое на двигатель, а возмущающим противоЭДС двигателя.

Общеизвестно, что в ВИД

$$u = ir + L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt}, \qquad (2)$$

где u – напряжение, прикладываемое к фазе двигателя; i – ток фазы двигателя; L – индуктивность фазы, которая меняется в функции угла поворота ротора; t – время.

Любой из пяти источников шумов можно описать как резонансное звено по крайней мере второго порядка:

$$W_к = \frac{K}{T_i^2 p^2 + 2\xi T_i p + 1}, \qquad (3)$$

где $W_к$ – передаточная функция колебательного звена i-го источника шума; K – коэффициент передачи; T_i – период собственных колебаний; ξ – коэффициент относительного демпфирования.

Если учесть, что противоЭДС или напряжение поступает на обмотку фазы, которую можно описать апериодическим звеном первого порядка

$$W_к = \frac{1/r}{(1/L)p + 1}, \qquad (4)$$

то изменение геометрических размеров каждой из пяти частей двигателя будет описываться выражением

$$\Delta A = E\frac{1/r}{(1/L)p+1}\sum_{i=1}^{5}\left(\frac{Ki}{T_i^2 p^2 + 2\xi T_i p + 1}\right). \qquad (5)$$

В отличие от других типов двигателей в ВИД L = var, т.е., например при широтно-импульсном регулировании напряжения, амплитуда переменной составляющей тока зависит от положения вала, однако сила притяжения ротора к статору также зависит не только от тока, но и от площади магнитного зацепления зубцов ротора и статора.

Наиболее радикальным методом уменьшения шумов, связанных с резонансами механических частей ВИД, является отсутствие высших гармоник, близких по частоте резонанса колебательного звена, так как при $ir << i\frac{dL}{dt} + L\frac{di}{dt}$ противоЭДС должна изменяться по синусоидальному закону.

Пусть

$$i = i_{max}\sin\Omega t;\ L = L_{max}\sin\Omega t;\ \frac{di}{dt} = i_{max}\Omega\cos\Omega t;$$

$$\frac{dL}{dt} = L_{max}\Omega\cos\Omega t,$$

тогда

$$i\frac{dL}{dt} + L\frac{di}{dt} = i_{max}\sin\Omega t\, L_{max}\Omega\cos\Omega t +$$

$$+ i_{max}\cos\Omega t\, L_{max}\Omega\sin\Omega t = \Omega i_{max} L_{max}\, 2\sin\Omega t,$$

т.е. при синусоидальном изменении тока и индуктивности воздействие на резонансные звенья не содержат высших гармоник.

Был исследован двухфазный нереверсивный ВИД [2] конструкции 8/4, где 8 – число полюсов на статоре, а 4 – число полюсов на роторе, с наружным диаметром активной части статора 116 мм, длиной активной части ротора 51 мм, диаметром ротора 58,3 мм. Он имел резонансную частоту 1,65 кГц при $\xi \approx 0{,}65$ и линейное изменение индуктивности при питании однополярным током, представляющим из себя половину синусоиды. При этом шум уменьшился на 20 дБ. Следует отметить, что у этого двигателя dL/dt изменялось не синусоидально, иначе следовало бы ожидать ещё большее уменьшение шума.

Конечно, проблема шумов требует дальнейшего экспериментального и теоретического исследования и может быть решена только при комплексном подходе к конструкции двигателя, формированию токов фаз и конструкции зубцов ротора и статора.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. В ВИД имеются в наличии по крайней мере пять резонансных звеньев, которые могут служить источниками шума при наличии ударных колебаний или при резонансах от первой либо высших гармоник напряжения или противоЭДС.

2. Уровень шума уменьшается с увеличением числа фаз и пар полюсов ВИД.

3. Конструктивное увеличение резонансных частот и коэффициента относительного демпфирования отдельных частей двигателя возможно за счёт склеивания пластин ротора и статора, компаундирования обмоток, в том числе и лобовых частей, закругления впадин полюсов ротора, применения жёстких клиньев в обмотке статора.

4. Увеличение стабильности зазора в функции угла поворота ротора, уменьшение несоостности ротора и статора, повышение податливости подшипников в радиальном направлении, уменьшают уровень шума.

5. Для формирования однополярного синусоидального тока обмотки двигателя следует питать синусоидальным напряжением.

6. Использование специальной конструкции зубцов ротора и статора позволяет изменять индуктивность фаз по синусоидальному закону.

Список литературы

1. **Wu. C., Pollock C.** Analysis and reduction of vibration and acoustic noise in the switches reluctance drive // IEEE transaction on industry application. 1995. Vol.31, № 1. P.91–98.

2. **Шабаев В.А., Захаров А.В.** Экспериментальное исследование двухфазных нереверсивных вентильно-индукторных двигателей // Электротехника. 2003. № 2. С.44–47.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Авторы опубликованных статей

Русаковский Алексей Михайлович – генеральный директор ОАО "ВЭМЗ", академик РАЭН, инженер-электрик. Окончил факультет "Электропривод и автоматизация промышленных установок" Ивановского энергетического института в 1975 г.

Лазарев Михаил Владимирович – генеральный директор ОАО "НИПТИЭМ", инженер-конструктор-технолог. Окончил факультет "Конструирование и производство радиоаппаратуры" Владимирского политехнического института в 1989 г.

Андрианов Михаил Васильевич – руководитель лаборатории микропроцессорного электропривода Владимирского государственного университета, канд. техн. наук. В 1985 г. окончил факультет технической кибернетики Владимирского политехнического института. В 1994 г. защитил диссертацию по теме "Исследование и разработка методов и технических средств повышения энергетических характеристик вентильных электроприводов".

Афонин Валерий Иванович – ведущий научный сотрудник ОАО "НИПТИЭМ". Окончил факультет электромеханики МЭИ в 1967 г., канд. техн. наук. Защитил диссертацию по теме "Исследование и вопросы проектирования двухскоростных асинхронных двигателей для привода лифтов" в 1979 г.

Васильченко Виктор Александрович – начальник производства ООО "ВЭМЗ-Спектр", инженер-электромеханик. Окончил факультет автоматики и электромеханики Воронежского политехнического института в 1985 г.

Вершинин Андрей Валентинович – ведущий конструктор ОАО "НИПТИЭМ", инженер-электромеханик. Окончил электротехнический факультет Кировского политехнического института в 1984 г.

Виноградов Анатолий Брониславович – технический директора ООО "ВЭМЗ-Спектр", канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ) в 1988 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Разработка структур, алгоритмов и средств векторного управления асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими и энергетическими показателями" в 1993 г. в ИГЭУ.

Ворошилов Владимир Сергеевич – начальник КБ ОАО "НИПТИЭМ". Окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института в 1967 г. по специальности "Электрические машины".

Голембиовский Михаил Иванович – начальник сектора КБ ОАО "НИПТИЭМ". Окончил электромеханический факультет Львовского политехнического института по специальности "Электрические машины и аппараты" в 1976 г.

Драгомиров Михаил Сергеевич – ведущий специалист по математическому моделированию ОАО "НИПТИЭМ", инженер-механик. Окончил автотранспортный факультет Владимирского государственного университета в 2001 г.

Жиров Валерий Васильевич – ведущий конструктор КБ ОАО НИПТИЭМ. Окончил электромеханический факультет Куйбышевского политехнического института по специальности "Электрические машины" в 1978 г.

Зайцев Андрей Михайлович – начальник бюро ОАО "НИПТИЭМ", инженер-электромеханик. Окончил электромеханический факультет Львовского политехнического института в 1976 г.

Кобелев Андрей Степанович – ведущий научный сотрудник ОАО "НИПТИЭМ", канд. техн. наук, докторант МЭИ. В 1980 г. окончил Кубанский аграрный университет по специальности "Электрификация сельского хозяйства". В 1991 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Разработка численных алгоритмов и методики поверочного электромагнитного расчёта трёхфазных асинхронных двигателей с безотходным и малоотходным магнитопроводом"в МЭИ.

Кравчик Артём Эммануилович – научный руководитель отдела технического развития ОАО "НИПТИЭМ", доктор техн. наук. Окончил электромеханический факультет Свердловского горного института в 1954 г. Защитил докторскую диссертацию по теме "Проектирование серий асинхронных двигателей общего применения" в 1988 г. в Институте электродинамики АН УССР.

Кругликов Олег Валерьевич – заместитель генерального директора ОАО "НИПТИЭМ" по развитию, инженер-механик. Окончил факультет "Материалы и технологические процессы" МГТУ им. Баумана в 1991 г.

Малышев Эдуард Евгеньевич – начальник испытательного центра ОАО "НИПТИЭМ". В 1991 г. окончил Владимирский политехнический институт.

Пискунов Сергей Валентинович – заместитель генерального директора ОАО "НИПТИЭМ". Окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института в 1980 г. по специальности "Электрические машины".

Поляков Виталий Алексеевич – ведущий конструктор ОАО "НИПТИЭМ". Окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института в 1967 г. по специальности "Электрические машины".

Родионов Роман Вячеславович – аспирант кафедры "Управление и информатика в технических и экономических системах" Владимирского государственного университета. В 1999 г. окончил ВлГУ по специальности "Управление и информатика в технических системах".

Сибирцев Андрей Николаевич – заведующий научно-исследовательской лабораторией ИГЭУ. Окончил электромеханический факультет ИГЭУ в 1989 г.

Сижанов Илья Сергеевич – инженер-конструктор ОАО "НИПТИЭМ", инженер-механик. Окончил автотранспортный факультет Владимирского государственного университета в 1997 г.

Чистосердов Валерий Львович – доцент кафедры ЭП и АПУ ИГЭУ, канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет ИГЭУ в 1989 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Системы управления асинхронным электроприводом с цифровым пространственно-векторным формированием переменных" в 1996 г. в ИГЭУ.

Шабаев Владимир Алексеевич – работает в ОАО "НИПТИЭМ", канд. техн. наук.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Индекс
71111

РУСЭЛПРОМ

НИПТИЭМ

ОАО "НИПТИЭМ" является Всероссийским научным центром по исследованию и созданию низковольтных асинхронных двигателей мощностью до 400 кВт.

Специалистами ОАО "НИПТИЭМ" глубоко исследованы электромагнитные, тепловентиляционные, виброакустические, надёжностные параметры электродвигателей. Созданы методики их расчёта, позволяющие на стадии проектирования с высокой точностью определять характеристики этих электрических машин. В настоящее время большинство методик программно представлены в системе СПРУТ на подмножестве естественной технической лексики и широко внедряются на электротехнических заводах России и СНГ. Новым направлением исследований является разработка интегрированных САПР для электротехнических предприятий.

Для разработки новых изделий успешно применяется CAD\CAM\CAE система Pro/ENGINEER, позволяющая не только решать задачи объемного проектирования и расчётов, но и генерировать (параллельно с получением чертежей на изделие и сложную формообразующую оснастку) управляющие программы для станков с ЧПУ.

Институт в течение 40 лет проводит разработку и внедрение в массовое производство общепромышленных серий асинхронных двигателей (и их модификации) мощностью от 1 до 400 кВт, соответствующих требованиям международных и российских стандартов. Институтом разработаны и внедрены в производство общепромышленные асинхронные двигатели серий 4А, 4АМ, АИС, АИР, 5А, 5АМ, 6А и их модификации: многоскоростные; для речного и морского флота с повышенным скольжением; с фазным ротором; устойчиво работающие в агрессивных средах; для привода электрооборудования атомных электростанций; для привода лифтов; для привода механизмов железнодорожного, речного и морского транспорта; для нужд спецтехники; со встроенной температурной защитой и другие, которые успешно выпускаются заводами России и стран СНГ. По техническим требованиям заказчиков специалисты ОАО "НИПТИЭМ" проводят НИР, проектирование и изготовление опытных образцов и малых партий импортозамещающих электродвигателей и электрических машин, максимально учитывающих условия и режимы работы приводного механизма, а также нестандартных по привязке и установочным размерам, мощности и напряжению.

Более 20 лет институт ведёт работы по одному из приоритетных направлений - разработке и производству электродвигателей мощностью от 3 до 400 кВт для привода электрооборудования (насосов, вентиляторов и т.п.) Атомных электростанций.

В ОАО "НИПТИЭМ" совместно с ООО "ВЭМЗ-Спектр" разрабатываются, исследуются и изготавливаются регулируемые по частоте вращения электродвигатели: асинхронные, вентильные, вентильно-индукторные, а также системы управления ими (в том числе и преобразователи частоты). За последние годы разработаны, изготовлены и переданы заказчику тысячи электродвигателей для частотно-регулируемых приводов. Электродвигатели комплектуются как отечественными частотными преобразователями, так и зарубежными – фирм "HITACH", KEB.

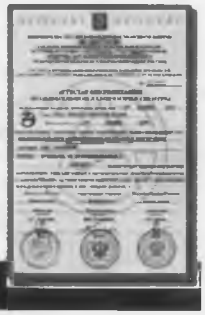
Кроме возможности регулирования частоты вращения в этих электродвигателях максимально учитываются условия, режимы работы приводных механизмов и машин, и они успешно применяются во всех отраслях промышленности, транспорта, энергодобывающих отраслях, в коммунальном и сельском хозяйстве. Асинхронные трёхфазные короткозамкнутые двигатели для частотно-регулируемых приводов изготавливаются на базе электрических машин серий АИР, 5А, 5АМ, 6А в следующих конструктивных исполнениях: без дополнительных элементов; с пристроенным датчиком обратной связи и с независимой системой охлаждения; с пристроенным электромагнитным тормозом и обдувом наружной поверхности вентилятором, установленным на валу двигателя; с пристроенным электромагнитным тормозом и датчиком обратной связи, а также с независимой системой охлаждения.

По согласованию с заказчиком электродвигатели могут поставляться и в других конструктивных исполнениях, а также в комплекте с преобразователями частоты.

**600009, г. Владимир,
ул. Электрозаводская. 1.
Тлф. (0922) 23-64-30.
Факс (0922) 23-13-33.**

ОАО "НИПТИЭМ" имеет испытательный центр электрических машин, обладающий уникальной технической базой для проведения испытаний:
- на стойкость к климатическим и механическим воздействиям;
- на степень защиты;
- для определения электрических параметров.

Центр проводит сертификационные испытания:
- асинхронных двигателей от 0,025 до 400 кВт;
- синхронных, синхронно-реактивных, вентильных двигателей.



ISSN 0013-5860 Электротехника. 2005. № 5. 1—64.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru