

ISSN 0013-5860

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
3 2011

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

2011, №3



МЕДАЛЬ
"ЗА ЗАСЛУГИ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"



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

У Ч Р Е Д И Т Е Л И

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)

С О В Е Т У Ч Р Е Д И Т Е Л Е Й

МАКАРЕВИЧ Л.В. (председатель совета), МЕЩЕРЯКОВ В.М., ОРЛОВ Ю.А., КОВАЛЕВ Ф.И.,
ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И. (заместитель председателя совета), ГЛОВАЦКИЙ А.В., ЧИБИРКИН В.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **РОЗАНОВ Ю.К.**, доктор техн. наук, проф.,
БЕЛКИН Г.С., доктор техн. наук, БЕСПАЛОВ В.Я., доктор техн. наук, проф., БРЯНЦЕВ А.М.,
доктор техн. наук, ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., канд. техн. наук, ДОЛКАРТ В.М., доктор техн. наук, ИНЬКОВ Ю.М.,
доктор техн. наук, проф., КОЗЯРУК А.Е., доктор техн. наук, проф., КОПЫЛОВ И.П., доктор техн. наук, проф.,
ЛАЗАРЕВ Г.Б., канд. техн. наук, ЛУРЬЕ А.И., канд. техн. наук, МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У., канд. техн. наук,
МОСКАЛЕНКО В.В., канд. техн. наук, проф., НИКУЛИН А.А., канд. техн. наук, ПАНИБРАТЕЦ А.Н., канд. техн. наук,
СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В., доктор техн. наук, проф. (зам. главного редактора), ТУБИС Я.Б., канд. техн. наук

Полная версия журнала в формате PDF размещена на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки (РУНЭБ): www.elibrary.ru.

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

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).

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.

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: (495) 361-95-96
E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru

Редактор отдела О.В. Кунавина
Научный редактор Л.А. Романова
Редактор З.П. Фёдорова
Компьютерная вёрстка Н.Н. Мерзляков

Сдано в набор 11.01.2010 Выход в свет 20.03.2011 Формат 60x88 1/8.
Печать офсетная. Печ. л. 8,5 Заказ 75
Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный 01330.

Отпечатано в ООО «Галлея-Принт»
Москва, 5-я Кабельная ул., 26

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОПРИВОД

- Афонин В.И., Кругликов О.В., Родионов Р.В.** Энергопотребление лифтовых электроприводов с различными системами управления 2
- Решмин Б.И.** Выбор регуляторов для асинхронного привода с прямым управлением моментом и обратной связью по скорости 7
- Усынин Ю.С., Валов А.В., Козина Т.А.** Асинхронный электропривод с импульсно-векторным управлением 15

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

- Мишин В.И., Каплун В.В., Макаревич С.С.** Автономный асинхронный генератор с внутренним ёмкостным возбуждением 20
- Бульчѳв А.В., Ерохин Е.Ю., Поздеев Н.Д., Филичев О.А.** Тепловая модель асинхронного двигателя для целей релейной защиты 26

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЗАЩИТЫ

- Васильев Д.С., Еремеев Д.Г., Павлов А.О.** Развитие высокочувствительной защиты дальнего резервирования 31
- Ерохин Е.Ю.** Новые реле максимального тока РСТ80 и их время-токовые характеристики 38

ИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

- Окнин Н.С., Маслов В.А., Астафьев В.В.** Терморезистивная изоляция монолит-1 класса нагревостойкости Н 42
- Евтушенко Ю.М., Огоньков В.Г., Сидоренко К.С., Яценко С.А.** Полиэфиримидные компаунды – основа систем изоляции современных тяговых электродвигателей 47

ТРАНСФОРМАТОРЫ

- Цицорин А.Н.** О физических процессах изменения магнитных свойств электротехнической стали и росте потерь холостого хода силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации 52

ХРОНИКА

- Стабилизация** напряжения электрической сети высокого напряжения внутрисетевыми управляемыми источниками реактивной мощности индуктивно-ёмкостного типа 58

Юрий Урунбекович Мавлянбеков 63

Валентин Алексеевич Прозоров 64

CONTENTS

ELECTRIC DRIVE

- V.I. Afonin, O.V. Kruglikov, R.V. Rodionov.** Power consumption of the lift electric drives with various control systems 2
- B.I. Reshmin.** The selection of regulators for the direct torque control induction motor drive during speed regulation. 7
- Yu.S. Usynin, A.V. Valov, T.A. Kozina.** Asynchronous electric drive with impulse-vectorial control. 15

ELECTRICAL MACHINES

- V.I. Michin, V.V. Kaplun, S.S. Makarevich.** Offline asynchronous alternator internal capacitive excitation 20
- A.V. Bulychyov, E.Yu. Erokhin, N.D. Pozdееv, O.A. Filichev.** The thermal model of an induction motor for the purposes of relay protection 26

DEVICES FOR CONTROL, DISTRIBUTION OF ELECTRIC ENERGY AND PROTECTION

- D.S. Vasil'ev, D.G. Eremееv, A.O. Pavlov.** Development of long-range backup protection 35
- E.Yu. Erokhin.** New overcurrent relays RST80 and their time-current characteristics 38

ISOLATION TECHNIQUE

- N.S. Oknin, V.A. Maslov, V.V. Astafyev.** Thermoset insulation monolit-1 with heat resistance class H. . . . 42
- Yu.M. Evtushenko, V.G. Ogon'kov, K.S. Sidorenko, S.A. Yaschenko.** Polyesterimide compounds are the baize of insulating systems of the modern electric and traction motors 47

TRANSFORMERS

- A.N. Tsitsorin.** Measurements of losses of idling of power transformers under operating conditions are spent. Measurements have shown that with loss service life in power transformers increase. The reasons of increase in losses of idling in power transformers are investigated. 52

CHRONICLE

- Voltage stabilization** of network system hing-voltage of a intranet controllable voltage surce reactive power inductive-capacitive variant 58

Yurii Urunbekovich Mavlyanbekov 63

Valentin Alekseevich Prozorov 64

Вологодская областная
универсальная
научная библиотека
им. И.В. Бабушкина

Энергопотребление лифтовых электроприводов с различными системами управления

АФОНИН В.И., КРУГЛИКОВ О.В., РОДИОНОВ Р.В.

Приведены анализ энергопотребления лифтовых электроприводов с различными системами управления и сравнение расчётных и экспериментальных данных для действующих лифтовых установок. Рассмотрены критерии энергоэффективности лифтовых установок и электродвигателей, работающих в них.

Ключевые слова: энергоэффективность, лифт, энергопотребление, электропривод.

Одним из основных элементов электромеханических приводов лифтов являются электродвигатель с регулируемой частотой вращения и автоматический регулятор скорости (преобразователь частоты), соответствующей мощности. Данные приводы пришли на смену традиционным приводам с двухскоростным асинхронным двигателем (АС2) в последней четверти прошлого столетия, чему способствовало широкое использование достижений микроэлектроники.

Опыт работы, а также отечественная и зарубежная литература [1–4] указывают на то, что наиболее перспективными в качестве электромеханического преобразователя энергии в электроприводах лифтов являются асинхронные высокомоментные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные с постоянными магнитами (VVVF). Укоренилось устойчивое мнение [1,2], что применение подобных систем управления лифтами позволит снизить потребление электроэнергии в два раза по сравнению с традиционными приводами с редуктором и канатоведущим шкивом.

В табл. 1 приведена номенклатура асинхронных двигателей, рекомендуемых для применения на редукторных и безредукторных лебедках в нерегулируемых и регулируемых приводах лифтов массового применения. Питание электродвигателей для безредукторных приводов осуществляется напряжением с частотой 10–30% частоты сети.

При выборе типа привода и системы управления (табл. 1) показатель энергопотребления является одним из определяющих критериев.

In article the power consumption analysis of the lift electric drives with various control systems is resulted. Comparison settlement and experimental data for operating of the lift installations is resulted. Criteria of power efficiency of the lift installations and the electric motors working in them are considered.

Key words: power efficiency, the lift, power consumption, the electric drive.

Авторы предлагают в качестве одного из критериев при выборе типа электропривода лифта использовать удельное электропотребление за цикл, воспользовавшись для этого рекомендациями Дж. Нипкова [5].

Стандартное потребление электроэнергии за цикл работы (кВт·ч):

$$E = \frac{k_1 k_2 h_{\max} P}{V \cdot 3600},$$

где k_1 – средний коэффициент нагрузки (для лифтов с канатоведущим шкивом 0,35); $k_2 = 0,5$ – коэффициент высоты шахты; h_{\max} – максимальная высота шахты, м; P – мощность электродвигателя, кВт; v – скорость перемещения, м/с.

Коэффициент k_1 характеризует среднестатистическую загрузку кабины лифта. При этом поездки кабины с номинальной нагрузкой менее вероятны по сравнению с поездками порожней кабины. Исходя из этого, для регулируемых приводов выбран $k_1 = 0,35$. Для лифтов, использующих традиционные двухскоростные электродвигатели с прямым пуском, коэффициент $k_1 = 0,75$, что учитывает потери электроэнергии в переходных процессах. Коэффициент k_2 характеризует вероятность перемещения кабины по всей высоте шахты. Он может быть увеличен или уменьшен в зависимости от использования кабины всеми этажами. Анализируя результаты исследований МГУП «Мослифт» [2] и литературные источники [5–8], мы предлагаем выделить (условно)

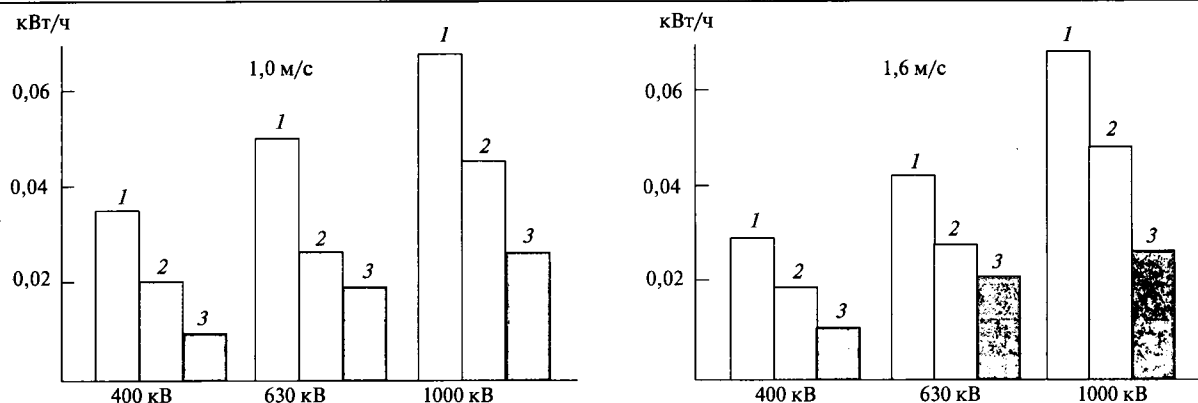


Рис. 1. Диаграмма энергопотребления за цикл: 1 – привод нерегулируемый АС2; 2 – привод регулируемый АСVVVF редукторный; 3 – привод регулируемый АСVVVF безредукторный

лифты массового применения, эксплуатируемые в РФ, в четыре категории (табл. 2).

Результаты исследований энергоэффективности рассматриваемых систем лифтовых приводов приведены в табл. 3 (расчёты) и на диаграммах рис. 1. При этом взято одно и то же количество циклов в сутки (z_c) и одинаковая высота подъёма (опускания). Полученные при

расчётах данные сравнивались с результатами испытаний на лифтах (табл. 4, 5).

В примерах 1 и 2 приведены результаты испытаний (табл. 4, 5), выполненных на разных лифтах, один из которых установлен в административном здании, а другой – в производственном.

Таблица 1

v , м/с	Q , кг	Привод с двухскоростным электродвигателем (АС2)	Привод с односкоростным электродвигателем (АСVVVF)	Привод асинхронный безредукторный (АСVVVF)
0,71	320	5АН160S6/18	АЧ132S6	АЧ180М8*
0,71	400	5АН160S6/18	АЧ132S6	АЧ180М8*
1,00	400	5АН180М6/24	АЧ132М6	АЧ200L8* АЧ180МА8**
1,00	630	5АН200МА6/24	АЧ160S6	АЧ200LC8* АЧ200LB8**
1,00	1000	5АН200МВ6/24	АЧ160М6	АЧ200LD8**
1,60	400	5АН180S4/16	АЧ132М4	АЧ200L8* АЧ180МА8**
1,60	630	5АН200МА4/24	АЧ160М6	АЧ200LC8* АЧ200LB8**
1,60	1000	5АН200МВ4/24	АЧ180М6	АЧ200LD8**
2,00	400	–	–	АЧ 180М8**
2,00	630	–	–	АЧ200LB8**

Примечание: v – скорость перемещения; Q – грузоподъёмность; * – прямой подвес; ** – полиспаст 2:1

Таблица 2

Группа	А	Б	В	Г
Типы зданий и их назначение	Жилые здания до 12 этажей, гостиницы	Жилые здания до 35 этажей, административные здания	Жилые здания до 50 этажей и более, большие гостиницы	Административные здания свыше 50 этажей, больницы
Интенсивность использования	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая
Среднее время работы (движения) в день, ч	1,5 (>1,0÷2,0)	3,5 (>3,0÷4,0)	4,0 (>3,0÷5,0)	6,0 (>5,0)
Среднее время покоя (ожидания) в день, ч	22,5	20,5	2,0	1,8

Таблица 3

$Q \times V \times h_M \times Z_T$	t_p	t_o	Z_c	Потребляемая за цикл электроэнергия, кВт·ч		
				АС2	VVVF редукторный	VVVF безредукторный
320×0,71×30×40000	1,5	22,5	110	0,0132	0,0080	0,0024
400×0,71×30×40000	1,5	22,5	110	0,0132	0,0080	0,0030
400×1,00×75×70000	3,5	20,5	192	0,0352	0,0201	0,0098
400×1,00×75×70000*	3,5	20,5	192	—	—	0,0093
630×1,00×75×70000	3,5	20,5	192	0,0508	0,0255	0,0198
630×1,00×75×70000*	3,5	20,5	192	—	—	0,0149
1000×1,00×85×120000*	4,0	20,0	329	0,0664	0,0455	0,0264
400×1,60×85×70000	3,5	20,5	192	0,0277	0,0194	0,0113
400×1,60×85×70000*	3,5	20,5	192	—	—	0,0104
630×1,60×85×120000	4,0	20,0	329	0,0443	0,0284	0,0221
630×1,60×85×120000*	4,0	20,0	329	—	—	0,0166
1000×1,60×85×120000*	4,0	20,0	329	0,0664	0,0478	0,0264
400×2,00×100×120000*	4,0	20,0	329	—	—	0,0122
630×2,00×100×120000*	6,0	18,0	603	—	—	0,0195

Примечание: h_M – максимальная высота, м; Z_T – число циклов в год; t_p – время работы в сутки, ч; t_o – время ожидания, ч; * – полиспаст 2:1.

Таблица 4

Вид привода	АСVVVF		АС2	
	АН200М8ЛБЧ		4АН200L6/24	
Электродвигатель	АН200М8ЛБЧ		4АН200L6/24	
Движение	Спуск кабины – работа на рабочей скорости	Работа на скорости дотягивания	Спуск	Подъём
Напряжение, В	374	374	375	378
Максимальный ток, А	8,11	2,93	83,14	79,01
Ток, А	8,11	2,93	12,37	9,65
Подводимая мощность, кВт	5,070	1,808	5,111	-0,634
Энергия, потребляемая в рабочем режиме, кВт·ч	2,106		5,747	
Энергия, потребляемая за цикл, кВт·ч	0,01014		0,02874	
Мощность, подводимая к приводу в состоянии покоя, Вт	46		—	
Потери в преобразователе частоты, Вт	155	83	—	

Пример 1. В качестве объекта исследований выбран лифт грузоподъемностью 500 кг, скорость перемещения 1 м/с, кратность полиспастной подвески 1:2. Масса кабины 1430 кг, противовес 1680 кг, предельное ускорение 0,5 м/с², количество этажей 8. Число включений составило 200 в час и продолжительность ПВ = 40%, время работы 7,2 с, время паузы 10,8 с. При подъеме пустой кабины к безредукторной лебедке мощность не подводилась, так как движение выполнялось за счёт противовеса. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Пример 2. В качестве объекта для замеров выбран лифт грузоподъемностью 320 кг, скорость перемещения 0,71 м/с, кратность поли-

спастной подвески 1:1. Количество этажей 6, число включений в час 150, продолжительность включения 62,5%. Результаты испытаний приведены в табл. 5.

Объекты в обоих примерах отличаются грузоподъемностью, скоростью перемещения груза, режимом работы (количество циклов в час и продолжительность включения) и количеством остановок (высотой здания). При оценке энергопотребления лифта можно выделить два критерия:

- энергия, потребляемая за цикл;
- энергия, потребляемая в рабочем режиме.

Адекватность обоих критериев подтверждается результатами испытаний, приведёнными в табл. 4, 5. Однако первый критерий является

Таблица 5

Вид привода	ACVVVF		AC2	
	AЧ200L8ЛБЧ		AC2-72-6/18	
Электродвигатель	AЧ200L8ЛБЧ		AC2-72-6/18	
Движение	Спуск	Подъём	Спуск	Подъём
Скорость перемещения, м/с	0,88	0,88	0,72	0,72
Напряжение, В	403	403	403	403
Ток, А	8,64	3,15	9,22	7,79
Ток максимальный, А	9,32	4,76	68,04	25,08
Подводимая мощность, кВт	3,775	1,391	3,288	1,369
Энергия, потребляемая в рабочем режиме, кВт·ч	1,310		2,209	
Энергия, потребляемая за цикл, кВт·ч	0,00873		0,01473	
Мощность, подводимая к приводу в состоянии покоя, Вт	44		–	
Потери в преобразователе частоты, Вт	180	142	–	

Таблица 6

Выход преобразователя частоты (двигатель)						Вход преобразователя частоты		
$U_{дгмс}$	$U_{д1}$	$I_{дгмс}$	$I_{д1}$	$P_{д}$	$f_{д}$	$I_{п.ч}$	$P_{п.ч}$	$U_{п.ч}$
Загрузка 0 кг								
394,60	314,98	10,56	9,59	4198,60	4,76	10,09	4355,70	399,07
278,21	139,39	9,75	7,89	-583,89	3,37	0,00	0,00	401,65
Загрузка 200 кг								
329,43	224,40	8,66	5,32	779,73	4,11	3,14	917,75	384,03
330,55	224,27	8,78	5,30	782,48	4,11	3,30	917,87	385,72
Загрузка 400 кг								
266,02	133,13	10,03	7,72	-530,28	3,30	0,00	0,00	383,96
389,29	322,23	11,09	9,69	4388,10	4,84	11,05	4575,40	380,46

Таблица 7

Число включений в час	90		120		150		180		200	
	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60
ПВ, %										
Энергопотребление, кВт·ч	0,874	1,329	0,875	1,321	0,881	1,323	0,879	1,298	0,88	1,296

показателем экономической эффективности эксплуатации лифта с тем или иным видом привода, а вторым рекомендуется пользоваться при проектировании приводов и электродвигателей, как энергоэффективного оборудования. Мощность, подводимая к приводу в состоянии покоя (ожидания), не используется при работе и, поэтому, снижает общую энергоэффективность лифтового привода в целом. Поскольку время ожидания может составлять до 95% общего времени подключения лифта, необходимо снижать потребление электроэнергии в режиме ожидания. Это следует предусмотреть в устройствах подключения и управления лифтами. Анализ работы преобразователей частоты («Altivar», КЕВ, «Omron», «Siemens») при управлении лифтами и другими механизмами, работающими с постоянными

моментами [3], позволил разделить потери в преобразователе на потери в выпрямителе, инверторе и системе управления. Выявлено, что потери в преобразователе имеют постоянную составляющую – потери в системе управления, определяемую мощностью, подводимой к приводу в состоянии покоя, и переменную составляющую – потери в выпрямителе и инверторе, которые зависят от мощности определяемой загрузкой кабины и направления движения.

Результаты измерений мощности двигателя АЧ200L8ЛБЧ и привода приведены в табл. 6 с различной загрузкой кабины лифта.

В табл. 6:

$U_{дгмс}$ – среднеквадратичное значение напряжения на выводах двигателя, В; $U_{д1}$ – первая гармоника напряжения на выводах двига-

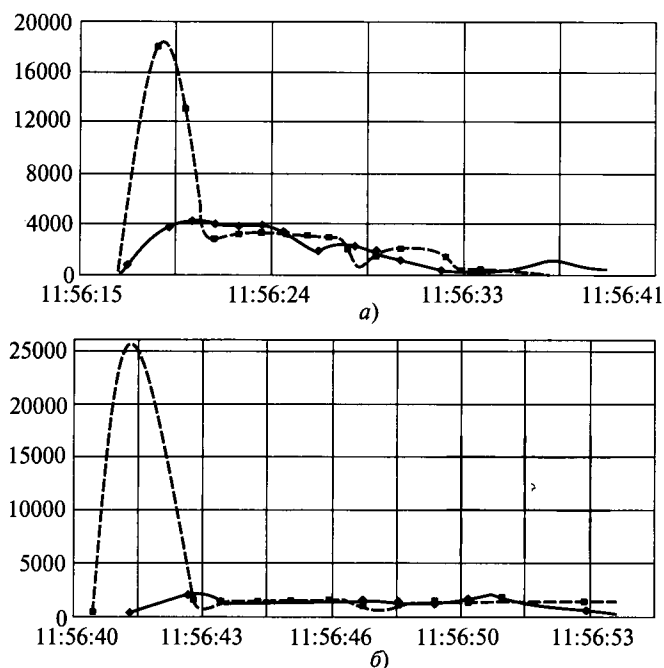


Рис. 2. Временная зависимость активной мощности при спуске (а) и подъёме (б) порожней кабины

теля, V ; $I_{\text{дгms}}$ – среднеквадратичное значение тока двигателя, А; $I_{\text{д1}}$ – первая гармоника тока двигателя, А; $P_{\text{д}}$ – подводимая мощность к двигателю, кВт; $f_{\text{д}}$ – частота напряжения на выводах двигателя, Гц; $U_{\text{п.ч}}$ – напряжение на входе преобразователя частоты, В; $I_{\text{п.ч}}$ – ток преобразователя частоты, А; $P_{\text{п.ч}}$ – подводимая мощность к преобразователю частоты, кВт.

На рис. 2 приведены временные зависимости активной мощности при спуске и подъёме порожней кабины: штриховая линия для привода AC2 и сплошная для ACVVVF.

При испытаниях лифта 320 кг и 0,88 м/с исследовалось влияние числа и продолжительности включений на энергопотребление (табл. 7).

Результаты испытаний показывают, что в частотно-регулируемых приводах изменение числа включений и продолжительности включений не оказывает существенного влияния на значение энергопотребления в отличие от традиционных приводов с двухскоростными асинхронными двигателями из-за невысокого энергопотребления в пуско-тормозных режимах.

Выводы

1. Частотное управление с обратной связью по скорости позволяет получить совершенную систему управления работой привода, адапти-

рованную согласно потребностям пользователя, а также высокие ходовые качества и комфорт, обеспечиваемые плавным разгоном и замедлением.

2. Потребление электроэнергии на этапах разгона и замедления выше у лифтовых установок с меньшей высотой подъёма, чем у установок, имеющих большую высоту подъёма.

3. Энергопотребление нерегулируемых приводов лифтов растёт с увеличением грузоподъёмности, скорости перемещения и числа циклов практически пропорционально.

4. Компактные безредукторные электроприводы лифтов с асинхронными высокомоментными тихоходными двигателями с частотным управлением – это низкое энергопотребление, пониженный шум и пусковые токи.

Список литературы

1. Varney G.C. The modern elevator electricdrive. Elevator electric drives//IAEE, England. 1989. P. 1–10.
2. Чуватов А.Б. Внедрение энергосберегающих технологий при модернизации лифтового оборудования//Лифт информ. 2000. № 10. С. 5–7.
3. Андрианов М.В., Афонин В.И., Родионов Р.В. Выбор преобразователя частоты для применения в электроприводе, работающем с постоянным моментом//Электротехника. 2008. № 5. С. 42–47.
4. Афонин В.И., Макаров Л.Н., Кругликов О.В., Родионов Р.В. Анализ энергоэффективности безредукторного лифтового привода//Электротехника. 2010. № 8. С. 35–40.
5. Energy-Efficient Elevators and Escalators//E4 WP3-Report Oktober 2007.
6. Эффективность потребления энергии в лифтовых установках. Группа Wittur. Ноябрь 2009.
7. Селик Ф. Потребление энергии малоиспользуемыми лифтами в режиме ожидания//Лифт. 2010. № 1. С. 47–52.
8. Дж. Барни Эффективность использования энергии в лифтах- предложения по классификации с точки зрения потребления энергии//Лифт. 2010. № 5. С. 25–29.

Афонин Валерий Иванович – ведущий научный сотрудник ОАО «НИПТИЭМ», канд. техн. наук. Окончил факультет электромеханики МЭИ в 1967 г. Защитил диссертацию по теме «Исследование и вопросы проектирования двухскоростных асинхронных двигателей для привода лифтов» в 1979 г.

Кругликов Олег Валерьевич – исполнительный директор ОАО «НИПТИЭМ». Окончил факультет «Материалы и технологические процессы» МВТУ им. Баумана в 1991 г.

Родионов Роман Вячеславович – научный сотрудник ОАО «НИПТИЭМ», канд. техн. наук. Окончил ВлГУ в 1999 г. Защитил диссертацию по теме «Исследование и совершенствование методов и средств испытания по определению энергетических показателей систем приводов с частотно-регулируемыми асинхронными двигателями» в 2005 г.

Выбор регуляторов для асинхронного привода с прямым управлением моментом и обратной связью по скорости¹

РЕШМИН Б.И.

Выбираются регуляторы для асинхронного привода с прямым управлением моментом и обратной связью по скорости, обеспечивающие заданное время регулирования при меняющихся параметрах двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, прямое управление моментом, обратная связь по скорости.

Использовать известные преимущества асинхронного двигателя перед двигателем постоянного тока при создании систем с высокими требованиями к качеству управления возможно только за счёт их усложнения. Наличие быстродействующих микропроцессоров позволило создавать высокоинтеллектуальные системы, которые обеспечивают приводам переменного тока хорошую управляемость.

На рис. 1 приведена структура асинхронного привода с прямым управлением моментом. При выборе регуляторов двигатель представлен структурой в виде передаточных функций, полученной в результате преобразований схемы замещения обобщённой машины в системе координат ротора d, q [1]. В дальнейшем моделирование будет выполнено в неподвижной системе координат, но так как выражения для токов, потокосцеплений и угловой скорости не зависят от выбранной системы координат, представленная структура может быть использована для выбора регуляторов.

Рассмотрим переходные процессы при пуске асинхронного двигателя (АД) и после этого сформулируем требования к системе управления. Объектом исследования является АД с параметрами: $P_H = 4000$ Вт, $U_H = 220$ В, $p_n = 2$, $J = 0,108$ кг·м², $L_{m*} = 0,189$ Гн, $R_s = 1,66$ Ом, $R_r = 1,27$ Ом, $L_{s1} = 0,0062$ Гн, $L_{r1} = 0,0107$ Гн, $f_H = 50$ Гц, где P_H — номинальная мощность; U_H — действующее номинальное напряжение; p_n — число пар полюсов; J — момент инерции двигателя; L_{m*} — индуктивность цепи намагничивания обобщённой машины; R_s , R_r — сопротивление статора и приведённого ротора; L_{s1} , L_{r1} — индуктивность рассеяния ста-

The selection of regulators for the direct torque control induction motor drive, which have a specified control time in spite of variable data.

Key words: induction motor, direct torque control, speed feedback.

тора и приведённая ротора; f_H — номинальная частота.

В структуре двигателя на рис. 1:

$$T_s = (L_{s1} + L_{m*}) / R_s;$$

$$T'_s = \{L_{s1} + [L_{r1} L_{m*} / (L_{r1} + L_{m*})]\} / R_s;$$

$$T_r = (L_{r1} + L_{m*}) / R_r;$$

$$T'_r = \{L_{r1} + [L_{s1} L_{m*} / (L_{s1} + L_{m*})]\} / R_r;$$

$$L_s = L_{s1} + L_{m*}.$$

На рис. 2 показаны осциллограммы переходных процессов при подаче на двигатель номинального напряжения. На рис. 2,а приведён момент двигателя M , угловая скорость и статический момент M_c . На рис. 2,б видно, что модуль вектора результирующего потокосцепления $\psi_{s0} = \sqrt{\psi_{sq}^2 + \psi_{sd}^2}$ имеет затухающие колебания большой амплитуды в начале пуска, при переходе двигателя в режим холостого хода достигает максимального (номинального) значения и несколько снижается при приложении статического момента. Модуль вектора номинального потокосцепления определяется из равенства:

$$\psi_{s0} \omega_n p_n = \psi_{s0} \frac{2\pi f_H}{p_n} p_n = \psi_{s0} 2\pi f_H = U_H \sqrt{2};$$
$$\psi_{s0} = \frac{U_H \sqrt{2}}{2\pi f_H} = \frac{220\sqrt{2}}{2\pi \cdot 50} = 0,99.$$

На рис. 2,в показаны осциллограммы составляющих момента двигателя $M = 1,5 p_n (i_{sq} \psi_{sd} - i_{sd} \psi_{sq})$ по оси q (ток i_{sq} и потокосцепление ψ_{sd}). В начале переходного процесса максимальным значениям тока i_{sq} соответствуют малые значения потокосцепления ψ_{sd} , а после окончания переходного процесса, связанного с приложением нагрузки,

¹Статья печатается в порядке обсуждения.

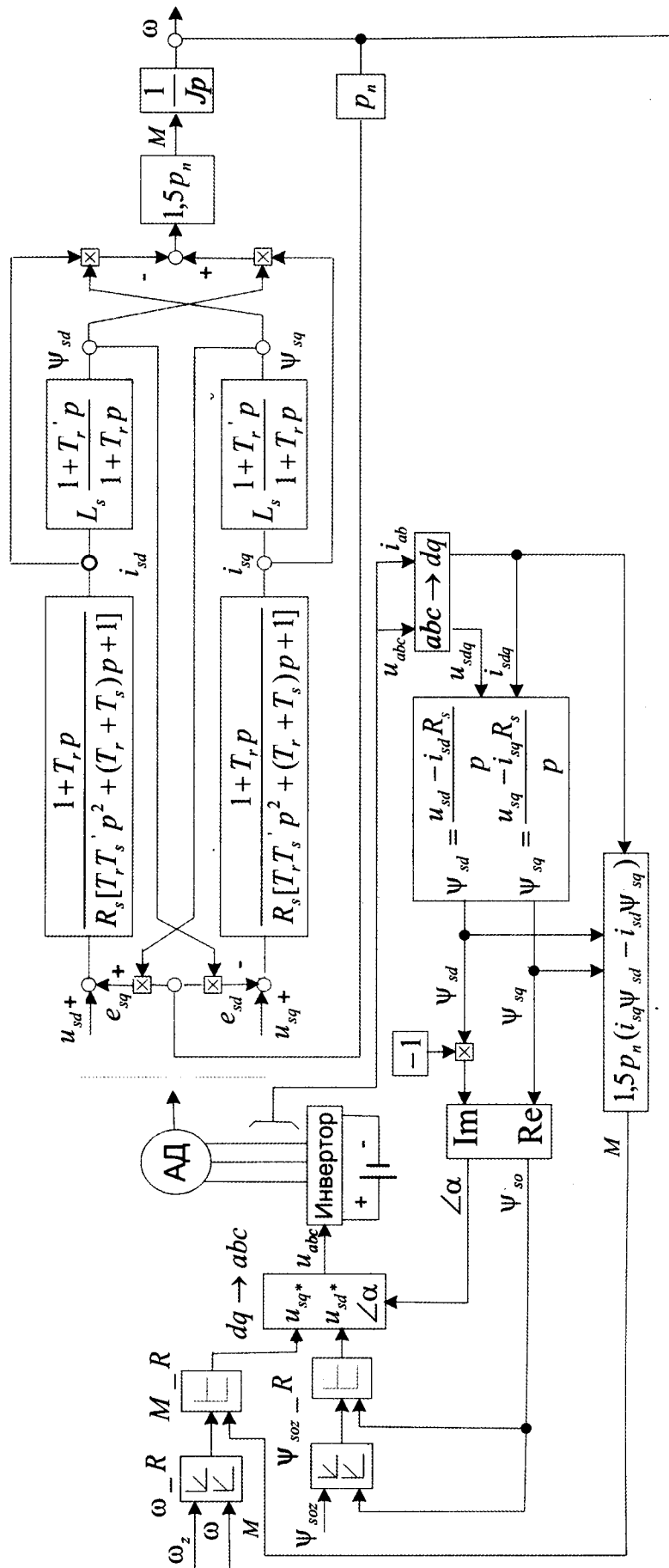


Рис. 1. Структура асинхронного привода с прямым управлением моментом и обратной связью по скорости

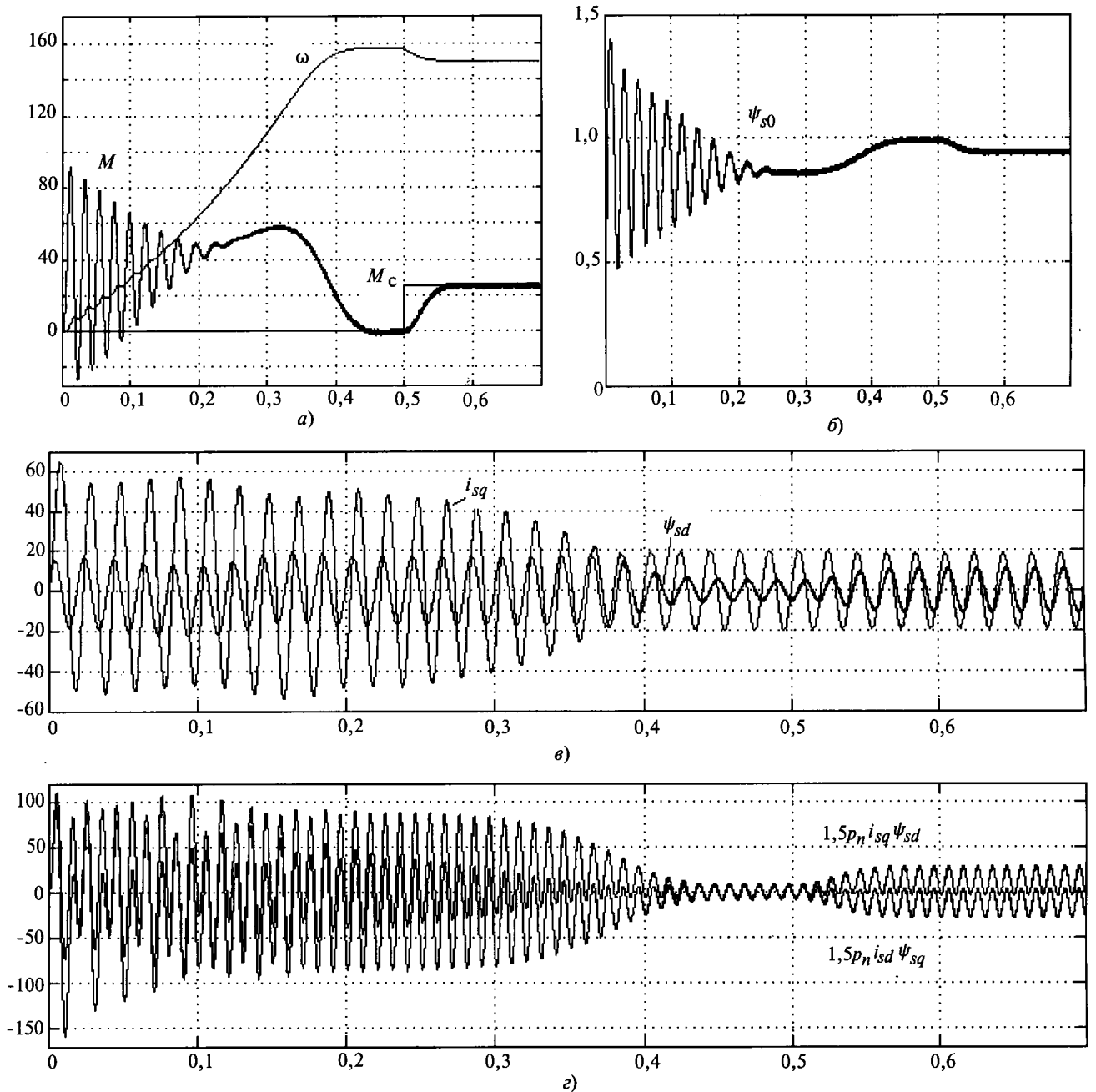


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов при пуске двигателя: а – момент двигателя (M), частота вращения (ω), статический момент; б – модуль вектора результирующего потокосцепления (ψ_{s0}); в – составляющие момента по оси q ; г – составляющие момента по двум осям

амплитудные значения тока и потокосцепления имеют малое смещение по времени, обеспечивая получение значительной составляющей момента.

На рис. 2,г приведены осциллограммы составляющих момента двигателя по осям d, q . После окончания переходного процесса, связанного с приложением нагрузки, периодические составляющие момента имеют разные знаки и при вычитании формируют постоянный момент при постоянном результирующем потокосцеплении.

Анализ переходных процессов позволяет определить причину колебаний момента при пуске двигателя:

- аperiodические составляющие токов и потокосцеплений по осям определяются напряжениями u_{sd}, u_{sq} имеющими сдвиг по фазе на угол $\pi/2$, т.е. имеют разные начальные условия;

- аperiodические составляющие потокосцеплений отстают от составляющих токов, так как постоянные времена T_r и T_r' значительно отличаются.

Момент инерции двигателя и его электрические параметры определяют степень демпфирования переходного процесса. При наличии только периодических составляющих двигатель имеет постоянный момент и постоянное результирующее потокосцепление.

Анализ переходных процессов при пуске двигателя позволяет сформулировать основные требования к системе управления:

- управление моментом должно выполняться при неизменном результирующем потокосцеплении;

- при управлении моментом должны быть сведены до минимума аperiodические составляющие параметров переходных процессов.

Общим требованием к системе управления является высокое быстродействие и хорошее демпфирование переходных процессов.

Так как структура АД является существенно нелинейной за счёт перекрёстных обратных связей по ЭДС, расчёт системы управления моментом, как линейной системы, можно выполнять при условии, что регулятор результирующего потокосцепления будет иметь высокое быстродействие и поддерживать потокосцепление с высокой точностью, а регулятор момента сведёт до минимума аperiodические составляющие переходного процесса. С учётом этого для аperiodических составляющих АД, как объект управления, можно заменить эквивалентной структурой, представленной на

рис. 3. Если учесть, что $T'_s \ll T_s, T_r$, то можно пренебречь членом при p^2 в передаточной функции между моментом и напряжением и тогда с учётом противоЭДС

$$\frac{M(p)}{u_s(p)} = \frac{1,5 p_n \psi_{s0} T_{эм} p (T_r p + 1)}{R_s T_{эм} (T_r + T_s) p^2 + (T_{эм} + T_r) p + 1}, \quad (1)$$

где $T_{эм} = \frac{J R_s}{1,5 p_n^2 \psi_{s0}^2}$ – электромеханическая постоянная времени АД.

Момент двигателя вычисляется через токи и потокосцепления. Из схемы замещения обобщённой машины [1] следует, что потокосцепления по двум осям можно вычислить, проинтегрировав напряжения за вычетом падений напряжений от токов на сопротивлении статора:

$$\psi_{sd} = \frac{u_{sd} - i_{sd} R_s}{p}; \quad \psi_{sq} = \frac{u_{sq} - i_{sq} R_s}{p}.$$

Напряжения по двум осям для неподвижной системы координат ($\omega=0$) можно получить, приняв сигналы от трёх датчиков напряжения (сумма трёх напряжений не равна нулю) равными:

$$u_{sd} = 2[u_a \sin \omega t + u_b \sin(\omega t - 2\pi/3) + u_c \sin(\omega t + 2\pi/3)]/3;$$

$$u_{sq} = 2[u_a \cos \omega t + u_b \cos(\omega t - 2\pi/3) + u_c \cos(\omega t + 2\pi/3)]/3.$$

Таким же образом можно найти токи по двум осям, используя сигналы от двух датчиков тока (сумма трёх токов равна нулю).

Результирующее потокосцепление ψ_{s0} рассчитывается через потокосцепления по двум осям и не зависит от их знака. Угол α между векторами потокосцеплений по

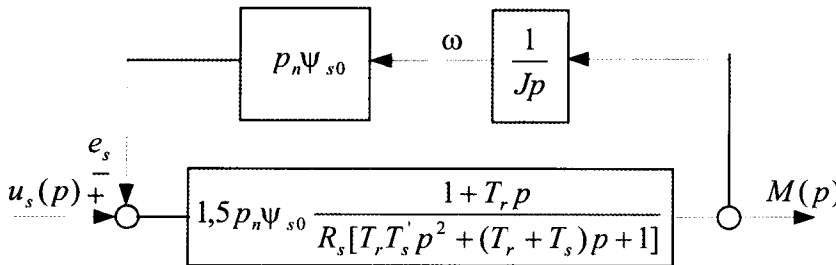


Рис. 3. Эквивалентная структура асинхронного двигателя при постоянном результирующем потокосцеплении

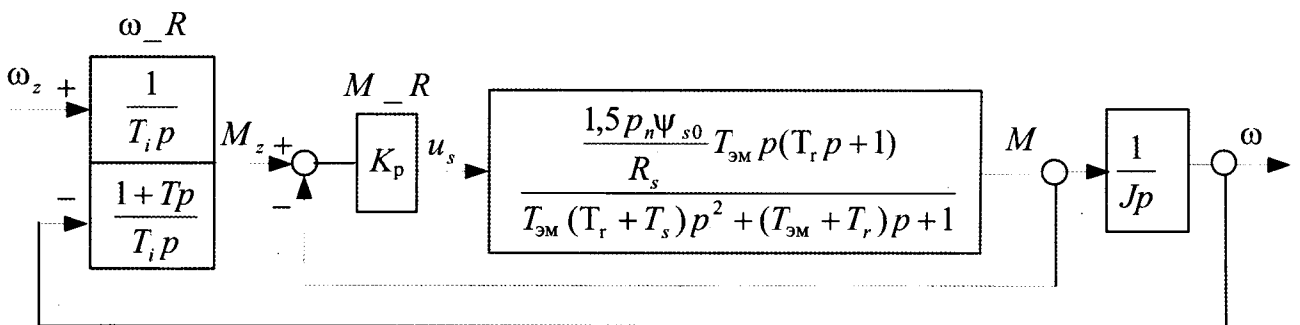


Рис. 4. Система управления моментом и угловой скоростью при постоянном результирующем потокосцеплении

осям вычисляется при условии, что потокосцепление ψ_{sq} является действительной частью вектора результирующего потокосцепления, а потокосцепление ψ_{sd} – его мнимой частью. В результате преобразований результирующий вектор сдвинут относительно питающего напряжения фазы u_a на угол $-\pi/2$. При смене знака потокосцепления ψ_{sd} на противоположный изменится на противоположный и знак угла, т.е. этот сдвиг будет равен $\pi/2$. Для того чтобы перейти к трёхфазной системе напряжений питания, необходимо ликвидировать опережение на угол $\pi/2$. Для этого следует выполнить преобразования сигналов с выходов регуляторов результирующего потокосцепления и момента u_{sd}^* , u_{sq}^* (сумма напряжений равна нулю) и затем привести вычисленные напряжения к масштабу управляющих сигналов генератора импульсов:

$$u_a = u_{sd}^* \sin(\omega t + \pi/2) + u_{sq}^* \cos(\omega t + \pi/2);$$

$$u_b = u_{sd}^* \sin[(\omega t - 2\pi/3) + \pi/2] + u_{sq}^* \cos[(\omega t - 2\pi/3) + \pi/2].$$

Часто для систем управления приводами переменного тока используют релейные регуляторы, достоинством которых считают высокое быстродействие системы управления. Но если технологический процесс не требует такого быстродействия и при этом исполнительный механизм обладает упругими свойствами с достаточно низкой собственной частотой упругих колебаний, то высокое быстродействие системы становится её недостатком. В этом случае близость собственных частот привода и механизма может вызвать неустойчивые или плохо демпфированные процессы, которые трудно устранить. Поэтому рассмотрим непрерывные регуляторы, позволяющие изменить быстродействие системы управления.

Рассмотрим системы управления моментом и скоростью при наличии постоянного результирующего потокосцепления ψ_{s0} (рис. 1,4). Связь между моментом и напряжением опре-

деляется выражением (1). Пропорциональный регулятор момента (M_R) имеет коэффициент усиления K_p .

Передаточная функция замкнутой системы при управлении моментом

$$\frac{M(p)}{M_z(p)} = \frac{aT_{эм}T_r p^2 + aT_{эм}p}{[T_{эм}(T_r + T_s) + aT_{эм}T_r]p^2 + [T_{эм} + T_r + aT_{эм}]p + 1} \approx \frac{aT_{эм}T_r p^2 + aT_{эм}p}{aT_{эм}T_r p^2 + aT_{эм}p + 1}, \quad (2)$$

где $a = \frac{1,5p_n \psi_{s0}}{R_s} K_p$.

При большом коэффициенте K_p можно пренебречь некоторыми членами в передаточной функции (2). При скачке задания коэффициент передачи практически равен единице и затем сигнал на выходе медленно снижается с большой постоянной времени $aT_{эм}$. Коэффициент K_p может быть ограничен при наличии помех.

Регулятор угловой скорости (ω_R) выполнен интегральным по входу и интегрально-пропорциональным по каналу обратной связи [2]. Передаточная функция замкнутого контура управления скоростью с учётом (2)

$$\frac{\omega(p)}{\omega_z(p)} = \frac{T_r p + 1}{B(T_r + T_s)p^3 + (B + B\frac{T_r}{T_{эм}} + TT_r)p^2 + (\frac{B}{T_{эм}} + T_r + T)p + 1} \approx \frac{1}{Tp + 1}, \quad (3)$$

где $B = \frac{T_i J R_s}{1,5p_n \psi_{s0} K_p}$ – постоянная времени интегрирования замкнутого контура регулирования.

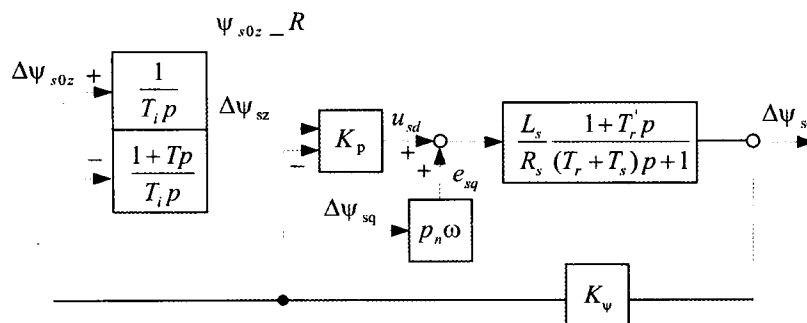


Рис. 5. Система управления результирующим потокосцеплением при постоянной угловой скорости

Из (3) следует, что при $B \rightarrow 0$ переходная характеристика определяется только независимой постоянной времени T . При приложении нагрузки время нарастания момента определяется настройкой замкнутого контура управления скоростью: выбранными значениями B и T .

Настройка регулятора потокосцепления ($\psi_{s0z} - R$, рис. 1,5) рассматривается при наличии номинального результирующего потокосцепления $\psi_{s0} = \sqrt{\psi_{sq}^2 + \psi_{sd}^2}$ в приращениях при возмущении как по каналу противоЭДС, так и по каналу задания. Регулятор потокосцепления состоит из последовательно включённых пропорционального регулятора с k_p и регулятора интегрального по входу и интегрально-пропорционального по каналу обратной связи. Коэффициент обратной связи по потокосцеплению оси d находится из выражения

$$k_\psi = \frac{d \sqrt{(\psi_{sd} + \Delta\psi_{sd})^2 + (\psi_{sq} + \Delta\psi_{sq})^2}}{d \Delta\psi_{sd}} \approx \frac{\psi_{sd}}{\psi_{s0}}$$

Передаточная функция замкнутого контура с пропорциональным регулятором при возмущении со стороны противоЭДС e_{sq} и при постоянной скорости

$$\frac{\Delta\psi_{sd}(p)}{\Delta\psi_{sq}(p)} = \frac{\frac{p_n \omega T_s}{1 + k_\psi k_p T_s} (1 + T_r' p)}{1 + \left[\frac{T_r + T_s}{1 + k_\psi k_p T_s} + \frac{k_\psi k_p T_s T_r'}{1 + k_\psi k_p T_s} \right] p} \quad (4)$$

Из (4) следует, что при большом k_p приращение потокосцепления по оси d стремится к нулю, а при его ограничении переходный процесс носит апериодический характер, так как $T_r' \ll T_r, T_s$.

Передаточная функция замкнутого контура с пропорциональным регулятором при возмущении со стороны задания и при постоянной угловой скорости имеет вид:

$$\frac{\Delta\psi_{sd}(p)}{\Delta\psi_{sz}(p)} = \frac{\frac{k_p T_s}{1 + k_\psi k_p T_s} (1 + T_r' p)}{1 + \left[\frac{T_r + T_s}{1 + k_\psi k_p T_s} + \frac{k_\psi k_p T_s T_r'}{1 + k_\psi k_p T_s} \right] p} \quad (5)$$

Переходные процессы при передаточных функциях (4) и (5) одинаковы. При очень большом k_p приращение потокосцепления по оси d равно заданному, а при его ограничении статическая ошибка будет ликвидирована

включённым последовательно астатическим регулятором.

С учётом (5) передаточная функция для контура с астатическим регулятором

$$\frac{\Delta\psi_{sd}(p)}{\Delta\psi_{s0z}(p)} = \frac{1}{k_\psi B \frac{(1 + T_r' p)}{\left(\frac{T_r + T_s + k_\psi k_p T_s T_r'}{1 + k_\psi k_p T_s} \right) p^2 + (B + T + T_r') p + 1}}, \quad (6)$$

где $B = \frac{T_i (1 + k_\psi k_p T_s)}{k_\psi k_p T_s}$ – постоянная времени интегрирования замкнутого контура.

$$\text{При } B \rightarrow 0 \quad \frac{\Delta\psi_{sd}(p)}{\Delta\psi_{s0z}(p)} = \frac{1}{k_\psi} \frac{1 + T_r' p}{(T + T_r') p + 1}$$

Таким образом, время регулирования потокосцепления можно изменять, задавая независимую постоянную времени регулятора T . При большом коэффициенте k_p $B \rightarrow T_i$. Следует отметить, что использование регулятора интегрального по входу и интегрально-пропорционального по каналу обратной связи обеспечивает независимость процесса регулирования от меняющихся параметров двигателя, связанных с изменением индуктивности L_m при насыщении машины или с изменением индуктивности рассеяния ротора и его сопротивления из-за эффекта вытеснения тока в пазах ротора [1].

Если коэффициент k_p ограничен, выбор параметров для астатических регуляторов при коэффициенте демпфирования переходного процесса $\xi \approx \sqrt{2}/2$ можно выполнить с помощью модульного критерия оптимизации [3,4] или путём сравнения коэффициентов характеристических уравнений передаточных функций с нормированными коэффициентами уравнений, имеющих такой коэффициент демпфирования.

На рис. 6 представлена модель описанной системы. Так как основной задачей считалось определение вида регуляторов и их расчёт, в модели принят источник постоянного напряжения бесконечной мощности, что позволяет инвертировать энергию в сеть и наблюдать переходные процессы, описываемые приведёнными передаточными функциями. При номинальном напряжении в режиме холостого хода двигателя напряжение источника постоянного напряжения равно $2\sqrt{2}U_H = 622$ В. С учётом двукратного момента при разгоне и

приложения нагрузки напряжение питания выбрано равным 680 В. Цифровые регуляторы имеют шаг квантования 0,2 мс. Частота коммутации вентилях инвертора равна 5000 Гц.

На рис. 7 показаны осциллограммы переходных процессов, полученные в результате моделирования. Как и в двигателе постоянно-го тока, задание на скорость подаётся после того, как потокосцепление достигнет установившегося значения. На рис. 7,а приведена осциллограмма реакции системы на скачок за-

дания скорости (6,4% от номинальной скорости), на рис. 7,б — осциллограмма разгона двигателя до номинальной скорости от задатчика интенсивности с последующим приложением статического момента. Результирующее потокосцепление практически не меняется при всех видах возмущений. Вид переходных процессов на этих осциллограммах характерен для систем управления, имеющих коэффициент демпфирования $\xi \approx \sqrt{2}/2$. На рис. 7,в показаны составляющие момента двигателя по

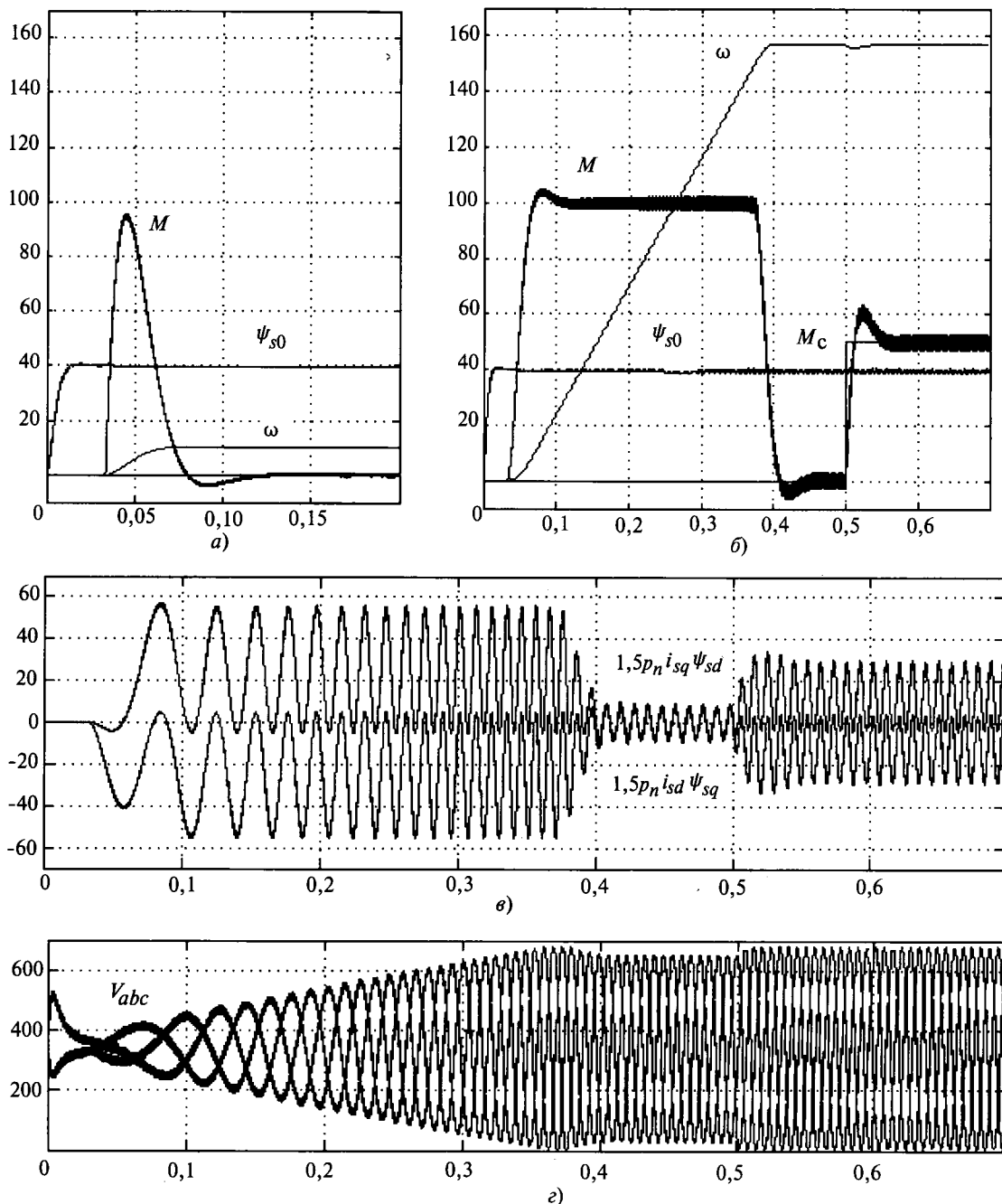


Рис. 7. Осциллограммы переходных процессов при моделировании системы управления: а — реакция на ступенчатое задание скорости; б — реакция на линейно нарастающее задание скорости с приложением статического момента; в — составляющие момента двигателя по двум осям; з — основные гармоники напряжения трёх фаз

двум осям. Как видно из осциллограммы, система управления обеспечивает требуемый закон формирования момента как при разгоне, так и при установившемся процессе. На рис. 7,г приведены основные гармоники напряжений трёх фаз относительно общей точки источника постоянного напряжения при разгоне двигателя с последующим приложением нагрузки, снятые на выходе фильтров Баттерворта.

Выводы

1. Использование пропорциональных регуляторов в сочетании с астатическими регуляторами, интегральными по входу и интегрально-пропорциональными по каналу обратной связи, обеспечивает высокое качество управления с возможностью менять быстродействие системы, выбирая необходимую постоянную времени регулятора T .

2. Регуляторы, интегральные по входу и интегрально-пропорциональные по каналу обратной связи, позволяют реализовать адаптивную систему, которая не реагирует на изменение параметров двигателя.

Список литературы

1. Решмин Б.И. Уточненная модель асинхронного двигателя как объект для построения системы регулирования//Электротехника. 2005. №7.
2. Naidi V.S.R. Modern electrical drive systems//Iron and Steel Engineer. 1970. Vol.47, № 10.
3. Kessler C. Uber Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise.//Regelungstechnik. 1954. № 12.
4. Решмин Б.И., Ямпольский Д.С. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. М.: Энергия.1975.

Решмин Борис Иванович – начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ, канд. техн. наук. Окончил МЭИ в 1962 г. Защитил диссертацию по теме «Динамика позиционных систем регулирования непрерывных широкополосных станов горячей прокатки» в 1977 г.

Асинхронный электропривод с импульсно-векторным управлением¹

УСЫНИН Ю.С., ВАЛОВ А.В., КОЗИНА Т.А.

Приводятся принцип работы, расчётные характеристики, экспериментальные исследования, сравнение с другими способами управления, методика математического моделирования, функциональная и структурные схемы электропривода с импульсно-векторным управлением асинхронным двигателем с фазным ротором. Обращается внимание на высокие энергетические показатели.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, импульсно-векторное управление, математическое моделирование, экспериментальные исследования, система управления.

Существует большая группа механизмов, у которых работа на низких угловых скоростях вращения сопровождается малыми нагрузками.

¹Работа выполняется в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. по направлению «Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии» (конкурс НК 637) и проблеме «Высоконадёжные энергосберегающие комплексы на основе новых типов вентильных электроприводов и обеспечение их безопасности».

The operation principle, estimated performances, experimental research, comparison with other control methods for asynchronous electric drive, principles of mathematical simulation and design procedure, functional and structure schemes of electric drive with impulse-vectorial control of asynchronous machine with wound rotor are given. Attention is paid to high efficiency of this system.

Key words: asynchronous electric drive, with impulse-vectorial control, mathematical simulation, experimental research, control system.

При работе в этой зоне не требуется большой точности поддержания угловой скорости. В первую очередь речь идёт о тех приводах, которые нецелесообразно отключать, а необходимо переводить на пониженную угловую скорость. Это – вентиляторы в промышленных зданиях, эксгаустеры в кислородно-конвертерных цехах и др. К этой же группе можно отнести электроприводы ленточных транспортеров, если они не работают в ночные смены, но в

зимнее время для исключения смерзания смазки в подшипниках их целесообразно переводить на пониженные угловые скорости вращения в режиме холостого хода. Приводы таких механизмов должны быть недорогими, без точного регулирования скорости и обладать малым энергопотреблением в режимах пониженных угловых скоростей.

Конечно, современные двухзвенные преобразователи частоты на полностью управляемых ключах решают все проблемы регулирования [1]. Однако их применение не всегда оправдано из-за высокой стоимости, сложной эксплуатации, высокого уровня квалификации персонала, в них заложены избыточные регулировочные возможности. Имеются также простые способы регулирования угловой скорости: переменное число пар полюсов в двигателе, регулирование напряжения на статоре, импульсное регулирование и т.д. Данные способы обладают малыми капитальными затратами, простотой эксплуатации, но имеют большие потери из-за скольжения [2].

Таким образом, для данных механизмов необходимо найти решение, которое одновременно будет простым и недорогим в исполнении и обладать малым энергопотреблением в режимах пониженных угловых скоростей. Одним из таких решений является вариант импульсно-векторного регулирования, описанный в данной статье.

Функциональная схема электропривода. В схеме импульсно-векторного регулирования асинхронного двигателя (АД) с фазным ротором (рис. 1) статорные обмотки Ax , Bu , Cz через тиристорный коммутатор подключены к питающей многофазной сети переменного тока A , B , C , а на выход коммутатора включены обмотки ротора асинхронного двигателя ax , bu . Обмотка cz может подключаться параллельно или оставаться свободной. Чтобы создать электромагнитный момент двигателя, в зависимости от сигнала с датчика положения ротора ДПР на два тиристора двух фаз статора АД, фазную зону которых пересекает магнитная ось обмотки ротора, подаются управляющие импульсы. Вектор МДС обмоток статора перемещается в расточке статора двигателя дискретно с шагом 60° . Эти переключения производят тогда, когда ориентация векторов МДС обмоток статора и ротора соответствует двигательному моменту [3].

Общая оценка и постановка задач исследования электропривода. Преимущества данного способа заключаются в следующем: во-первых, используется типовое, давно освоенное обо-

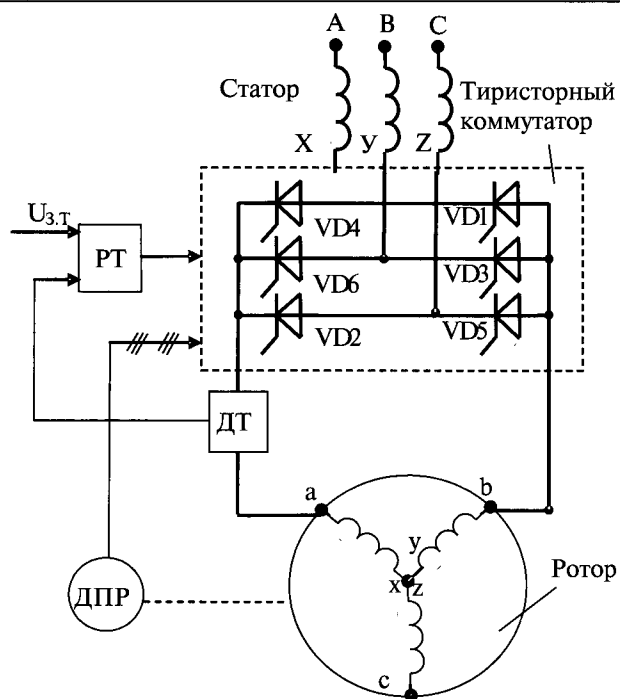


Рис. 1. Функциональная схема электропривода: ДТ – датчик тока; РТ – регулятор тока; ДПР – датчик положения ротора; $U_{3,Т}$ – источник задающего напряжения, пропорционального желаемому току статора

дование, что облегчает внедрение и эксплуатацию; во-вторых, применение простой схемы управления не требует больших затрат на её реализацию; в-третьих, так как двигатель переведён в синхронный режим и, следовательно, в нём отсутствует скольжение, то можно надеяться, что рассматриваемый вариант будет обладать высокими энергетическими показателями.

Вместе с тем существуют и определённые сомнения, связанные с наличием высших гармоник, что, естественно, ухудшает энергетические показатели. Кроме того, статические и динамические характеристики электропривода во многом остаются неясными из-за импульсного характера работы системы управления.

В электроприводе присутствуют два рода пульсаций угловой скорости и момента: во-первых, вентильный преобразователь, работающий от сети, вызывает высокочастотные импульсы f_1 в выпрямленном токе, частота следования импульсов для данной схемы управления составляет 50 Гц; во-вторых, реализуемый принцип формирования момента обуславливает наличие импульсов низкой частоты f_2 , частота следования которых определяется соотношением частоты сети и угловой скорости вращения ротора.

На рис. 2 изображены расчётные кривые электропривода в режиме поддержания угло-

вой скорости, по которым видно, что ток в обмотках двигателя носит импульсный несинусоидальный характер, он вызывает пульсации момента, что, в свою очередь, обуславливает пульсации скорости. Наличие f_1 и f_2 вызывает большое число высших гармоник, поэтому необходимо уточнить потери, вызванные ими.

Можно предполагать, что электропривод, включённый по разомкнутой схеме, имеет склонность к колебаниям, так как двигатель переведён в синхронный режим, а демпферная обмотка отсутствует. Существующие двигатели с фазным ротором имеют шихтованный магнитопровод, поэтому нельзя надеяться на демпфирующее воздействие вихревых токов. Следовательно, прежде чем давать рекомендации по применению привода, необходимо решить две задачи: уточнить энергетику электропривода, учитывая большое число высших гармоник в кривой тока ротора и выяснить динамические возможности этого способа.

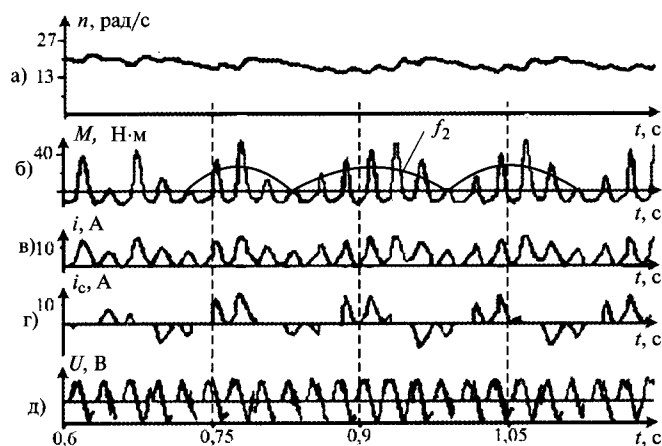


Рис. 2. Фрагмент расчётных кривых электропривода в режиме поддержания скорости: а – угловая скорость n ; б – динамический момент M ; в – ток ротора i ; г – ток фазы С статора i_c ; д – напряжение на выходе преобразователя U

Характеристики электропривода в установившемся режиме. Энергетические показатели электропривода определялись путём математического моделирования и проверялись экспериментально. В основу математической модели была положена схема, приведённая на рис. 1. Расчёт проводился в программе Visual Basic 6.0. Вычисление активной P_c и полной S_c мощностей, потребляемых из сети, велось по мгновенным значениям токов и напряжений, причём ток раскладывался на активную и пассивную составляющие. Например, для скорости $0,3n_{0H}$ и $M_c/M_H = 0,2$ для импульсно-векторного управления были получены следующие значения: коэффициент мощности

$k_M = 0,57$, потери активной мощности $\Delta P/P_H = 0,2$. Для сравнения в этих же условиях были получены показатели для реостатного ($k_M = 0,25$, $\Delta P/P_H = 0,39$) и частотного ($k_M = 0,6$, $\Delta P/P_H = 0,1$) управления. Следовательно, можно сказать, что энергетические показатели импульсно-векторного управления занимают промежуточное положение: они лучше, чем в традиционных схемах с регулируемым напряжением на статоре, но немного уступают частотному электроприводу. Для практики данный метод приемлем.

В ходе исследования импульсно-векторного способа управления электроприводом было установлено, что он развивает сравнительно малые моменты, что объясняется последовательным соединением обмоток статора и ротора и импульсным характером напряжения питания (для расчёта брался серийный АД). Поэтому были рассмотрены различные варианты, устраняющие этот недостаток, – подключение электропривода к источнику повышенного напряжения, независимое питание цепей ротора и статора, применение реверсивного тиристорного комплекта [3]. Эти мероприятия позволяют восстановить момент электропривода до номинальных значений, но требуют двойного комплекта силового электрооборудования.

Динамические характеристики. Динамические свойства электропривода с импульсно-векторным регулированием изучались на модели, структурная схема которой представлена на рис. 3. Состояние модели описывается переменными: $U_{зад}$ – напряжением задания; $E_{ТК}$ – ЭДС тиристорного коммутатора ТК; I – током силовой цепи; M – электромагнитным моментом, развиваемым двигателем; M_c – моментом статической нагрузки; n_p – угловой скоростью и $E_{вр}$ – ЭДС вращения ротора. Структурная схема содержит: логическое устройство ЛУ, частота переключения которого определяется разницей угловых скоростей вращения МДС статора и ротора; фильтр Φ с постоянной времени T_Φ ; звено чистого запаздывания ЗЧЗ с постоянной времени и импульсный элемент ИЭ, учитывающие однополупериодный режим выпрямления напряжения питающей сети тиристорным коммутатором; звено двигателя Д с постоянной времени T_d , учитывающее механическую инерцию вращающихся частей электропривода; звено ЭЦ, преобразующее разность ЭДС тиристорного коммутатора $E_{ТК}$ и ЭДС вращения $E_{вр}$ в ток I обмоток статора и ротора. Пропорциональные звенья с коэффициентами линеаризации K_x и Φ_x учитывают связь между приращениями мо-

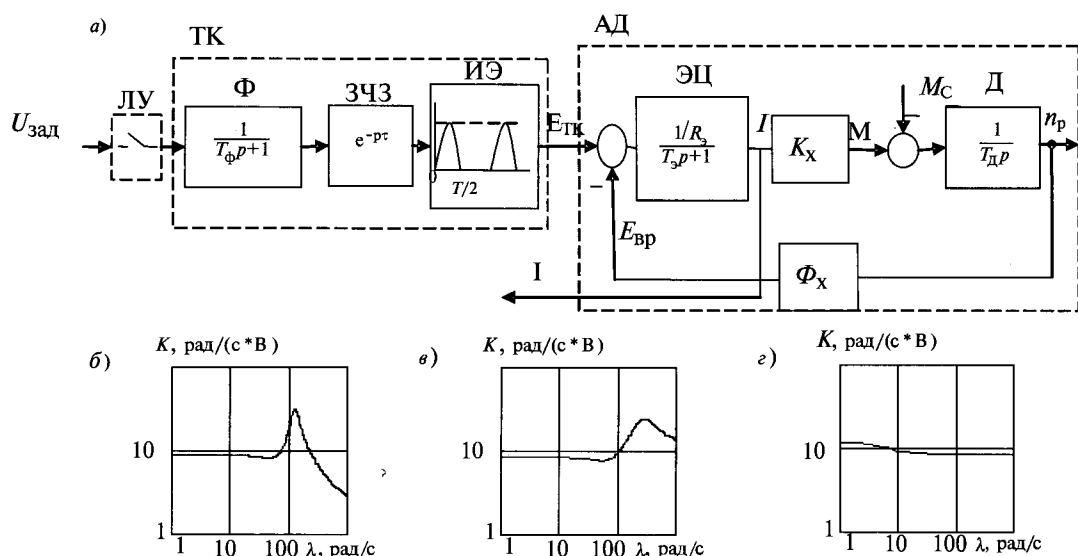


Рис. 3. Структурная схема комплекса тиристорный коммутатор – асинхронный двигатель (ТК – АД) в схеме импульсно-векторного управления (а) и его частотные характеристики при угловых скоростях вращения $n = 10$ рад/с (б), $n = 40$ рад/с (в) и $n = 80$ рад/с (г)

мента и тока, а также ЭДС вращения и угловой скоростью ротора. В электроприводе в каждый момент времени включены только две фазы статора последовательно с обмотками ротора, поэтому электрическую цепь последовательного соединения обмоток справедливо заменить эквивалентной, содержащей только одну обмотку с активным сопротивлением R_3 и индуктивностью L_3 . По известным R_3 и L_3 определялись электромагнитная постоянная времени $T_3 = L_3/R_3$ и коэффициент передачи $K_3 = 1/R_3$.

По этой динамической модели были рассчитаны частотные характеристики электропривода. Поскольку схема носит принципиально импульсный характер, то использовался аппарат псевдочастотных характеристик [4]. Псевдочастота $\lambda = (2/T) \text{tg}(\omega T/2)$, где T – период квантования, который задаётся логическим устройством ЛУ. В качестве примера на рис. 3 представлены псевдочастотные характеристики для трёх фиксированных угловых скоростей вращения (10, 40 и 80 рад/с), откуда

видно, что объект регулирования обладает различными свойствами на разных угловых скоростях вращения, а на низких скоростях характеризуется повышенной колебательностью. Резонансный максимум при этом достигает $M = 3,5$.

На модели анализировалось две группы способов снижения степени колебательности электропривода: параметрические и схемные. Результаты расчётов приведены в таблице. Параметрические способы (увеличение момента инерции вращающихся масс электропривода, введение активного сопротивления в силовую цепь) позволяют снизить резонансный максимум до приемлемого уровня $M = 1,0 \div 1,3$, но не могут быть рекомендованы из-за неудовлетворительной энергетике и дополнительных затрат на оборудование.

Были рассмотрены два варианта схемных способов коррекции: с непрерывными регуляторами тока и угловой скорости и с импульсными. Применение непрерывных регуляторов тока и угловой скорости оказалось малоэф-

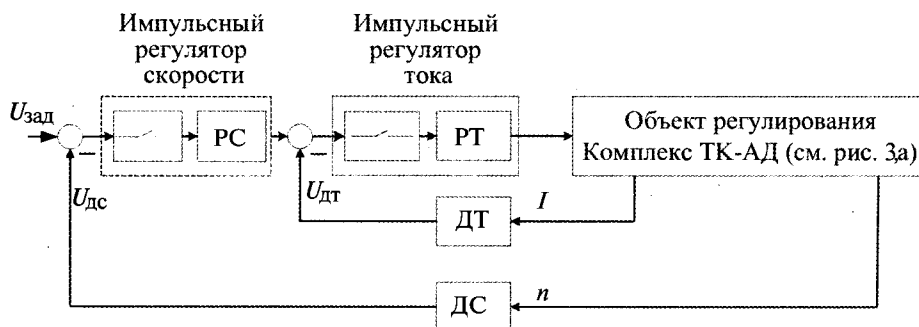


Рис. 4. Структурная схема с последовательным соединением импульсных регуляторов: РС – регулятор скорости; ДС – датчик скорости; РТ – регулятор тока; ДТ – датчик тока

Показатели качества процессов в электроприводе

Угловая скорость вращения, рад/с	Показатели	Значения				
		До коррекции	С дополнительными маховыми массами	С добавочным сопротивлением	С непрерывными регуляторами тока и скорости	С импульсными регуляторами тока и скорости
10	Время переходного процесса $t_{п.п.}$ с	3,4	16,0	0,9	3,0	2,0
	Резонансный максимум M	3,5	1,2	1,0	1,0	1,2
40	Время переходного процесса $t_{п.п.}$ с	5,8	15,0	2,5	4,0	5,0
	Резонансный максимум M	2,8	1,2	1,0	1,0	1,1
80	Время переходного процесса $t_{п.п.}$ с	12,7	22,0	6,4	20,0	1,0
	Резонансный максимум M	1,61	1,1	1,0	1,0	1,0

фективным, так как условия их настройки существенно зависят от частоты f_2 , а следовательно, от скорости электропривода.

Наилучшие результаты показала схема с последовательным соединением импульсных регуляторов скорости и тока (рис. 4). По топологии она схожа со схемой подчинённого регулирования. Частота квантования импульсных элементов в регуляторах переменна и совпадает с частотой импульсного элемента ЛУ.

Исследование частотных характеристик представленной схемы показало, что электропривод удовлетворяет условиям устойчивости на всех угловых скоростях вращения вала ротора электропривода (таблица).

Экспериментальные исследования. Для подтверждения теоретических расчётов был выполнен экспериментальный образец на базе АД с фазным ротором МТФ111-6 ($P_N = 3,5$ кВт, $M_N = 7$ Н·м, $I_{1Н} = 10,7$ А). В рассечку между обмотками статора и ротора был подключён тиристорный коммутатор с тиристорными диодными модулями МТОТО40-10-3А.

Полученные в ходе эксперимента механические, электромеханические, энергетические и частотные характеристики имеют такой же характер и численные значения, близкие к рассчитанным в математической модели. Поэтому можно сделать вывод о верности и адекватности математической модели.

Вывод. Представленный способ импульсно-векторного управления имеет энергетические показатели, средние между реостатным и частотным управлением. Он может быть рекомендован для приводов, которые допускают пониженные угловые скорости вращения, не

требуют высокой точности поддержания скорости при работе на низких скоростях и с малыми моментами (вентиляторы, транспортёры в ночное время суток, насосы, компрессоры, воздухоподогреватели, эксгаустеры и др.).

Список литературы

1. Кудрявцев Ф.В., Ладыгин А.Н. Современные преобразователи частоты в электроприводе // Приводная техника. 1998. № 3.
2. Браславский И.Я., Ишматов З.И., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Изд. центр «Академия», 2004.
3. Усынин Ю.С., Валов А.В. Импульсное управление асинхронным двигателем с фазным ротором // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2007. №8. С. 24–27.
4. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1970.

Усынин Юрий Семёнович – профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского ГУ, доктор техн. наук. Окончил энергетический факультет Челябинского политехнического института в 1959 г., в 1964 г. – очную аспирантуру при кафедре электропривода Московского энергетического института. Защитил докторскую диссертацию по теме «Следящий дифференциальный электропривод автономных объектов» в МЭИ в 1994 г.

Валов Артём Владимирович – доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского ГУ, канд. техн. наук. Окончил энергетический факультет Южно-Уральского ГУ в 2006 г. Защитил диссертацию по теме «Импульсно-векторное управление асинхронным электроприводом с фазным ротором» в 2009 г.

Козина Татьяна Андреевна – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского ГУ. Окончила энергетический факультет Южно-Уральского ГУ в 2008 г.

Автономный асинхронный генератор с внутренним ёмкостным возбуждением

МИШИН В.И., КАПЛУН В.В., МАКАРЕВИЧ С.С.

Предложено использование эффекта внутренней ёмкостной компенсации для расширения возможности регулирования и управления режимами работы автономного асинхронного генератора с целью повышения уровня напряжения и степени его стабилизации при изменении нагрузки, в частности, при пуске асинхронного двигателя соизмеримой мощности, существенного уменьшения расхода реактивной мощности на возбуждение генератора и повышения его коэффициента мощности.

Ключевые слова: автономный асинхронный генератор, реактивная мощность, внутренняя ёмкостная компенсация.

У автономного асинхронного генератора (ААГ) проявляются такие крупные недостатки, как необходимость большой реактивной мощности для собственного возбуждения и компенсации реактивной мощности нагрузки, а также значительное снижение напряжения и частоты с ростом нагрузки [1–3]. Поэтому, несмотря на конструктивную простоту, высокую надёжность, относительно низкую стоимость, он не стал достойным конкурентом синхронному генератору, как основному источнику электроэнергии в автономных системах электроснабжения.

Положительное действие внутренней ёмкостной компенсации реактивной мощности в компенсированном асинхронном двигателе (КАД) [4] в соответствии с принципом обратимости электрических машин, вероятно, проявит себя в улучшении свойств также и компенсированного автономного асинхронного генератора (КААГ) и даст возможность в отдельных случаях заменить им синхронный.

Компенсированной (КАМ) называем асинхронную машину (АМ) с внутренней ёмкостной компенсацией, которая в отличие от внешней оказывает влияние на свойства самой машины и осуществляется совмещением функций обмоток статора как рабочих обмоток АМ и компенсирующих по реактивной мощности.

Proposed use of the effect of internal capacitance compensation for the expansion of opportunities for regulation and management modes of the autonomous induction alternator in order to increase the voltage level and the degree of stabilization when the load changes, in particular, when starting an asynchronous motor comparable power, significantly reduce the flow of reactive power for excitation of the generator and increase its power factor.

Key words: autonomous induction generator, reactive power, the internal capacitance compensation.

При этом фазная зона (60°) трёхфазной обмотки статора базовой серийной АМ делится на две одинаковые части, пространственно смещённые между собой в пазах сердечника статора на угол $\theta = 30^\circ$ и соединённые по схеме поворотного автотрансформатора (АТ) на электрическую ёмкость C_Δ .

Одна из частей является основной рабочей обмоткой КАМ и первичной обмоткой АТ. Она сохраняет главные свойства рабочей обмотки статора базовой АМ, по характеру тока \dot{I}_1 и мощности является индуктивно-активной. Вторая часть представляется дополнительной рабочей обмоткой статора и вторичной обмоткой поворотного АТ с ёмкостно-активным током \dot{I}_Δ по характеру активной нагрузки машины и ёмкостной на выходе АТ.

Пространственное смещение на угол θ относительно друг друга обмоток АТ, пересекаемых одним и тем же вращающимся магнитным потоком, определяет сдвиг по фазе во времени на такой же угол θ их ЭДС \dot{E}_1 и $\dot{E}_\Delta = \dot{E}_1 e^{j\theta}$, геометрическая разность которых создаёт выходное напряжение АТ

$$\dot{U}_{C\Delta} \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1 \text{ или } U_{C\Delta} = 2U \sin \frac{\theta}{2},$$

где $U \approx E_1$ – рабочее напряжение генератора и основной обмотки статора. В любом режиме КАМ ток вторичной цепи АТ равен току его ёмкостной нагрузки $\left(\dot{I}_\Delta = \frac{\dot{U}_{C\Delta}}{-jx_{C\Delta}} \right)$ и одновременно

является рабочим током вторичной обмотки (дополнительной обмотки статора). Связь между всеми токами машины определяется условием равновесия МДС или токов, приведённых к единой пространственной оси основной обмотки статора [5]:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2, \quad (1)$$

где $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta} + \dot{I}_2$ – намагничивающий ток, совокупное действие всех токов (\dot{I}_1 – ток основной обмотки статора, \dot{I}_Δ – ток дополнительной обмотки статора или вторичной цепи АТ, \dot{I}_2 – ток фазы ротора) машины; $e^{-j\theta}$ – поворотный множитель приведения тока \dot{I}_Δ к оси основной обмотки.

В последующем все аналитические выражения представлены для одной фазы КАМ в симметричном режиме установившегося процесса.

В компенсированном асинхронном двигателе (КАД) вторичная обмотка АТ сдвинута относительно первичной на угол θ встречно направлению вращения поля и потому её ЭДС $\dot{E}_{\Delta d}$ опережает ЭДС \dot{E}_{1d} основной обмотки на такой же угол, т.е. $\theta = +30^\circ$ (рис. 1, а, 2). Это определяет направления векторов $\dot{U}_{C\Delta}$, \dot{I}_Δ , \dot{I}_1 двигательного режима [4] КАМ.

В КАМ при смене знака скольжения аналогично классической АМ тоже происходит изменение знака действия во времени ЭДС \dot{E}_2 , активных составляющих тока \dot{I}_2 ротора и тока \dot{I}_1 основной обмотки статора, но ток \dot{I}_Δ вторичной цепи АТ не изменяет своего направления, так как он определяется напряжением $\dot{U}_{C\Delta}$ на выходе АТ, которое в свою очередь зависит от взаимного положения ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_Δ обмоток поворотного АТ, не изменяющихся при смене знака скольжения. Для изменения направления активной составляющей тока \dot{I}_Δ вторичной обмотки АТ, необходимого для генераторного режима, нужно изменить и знак угла θ , т.е. сдвинуть вторичную обмотку поворотного АТ относительно первичной в сторону

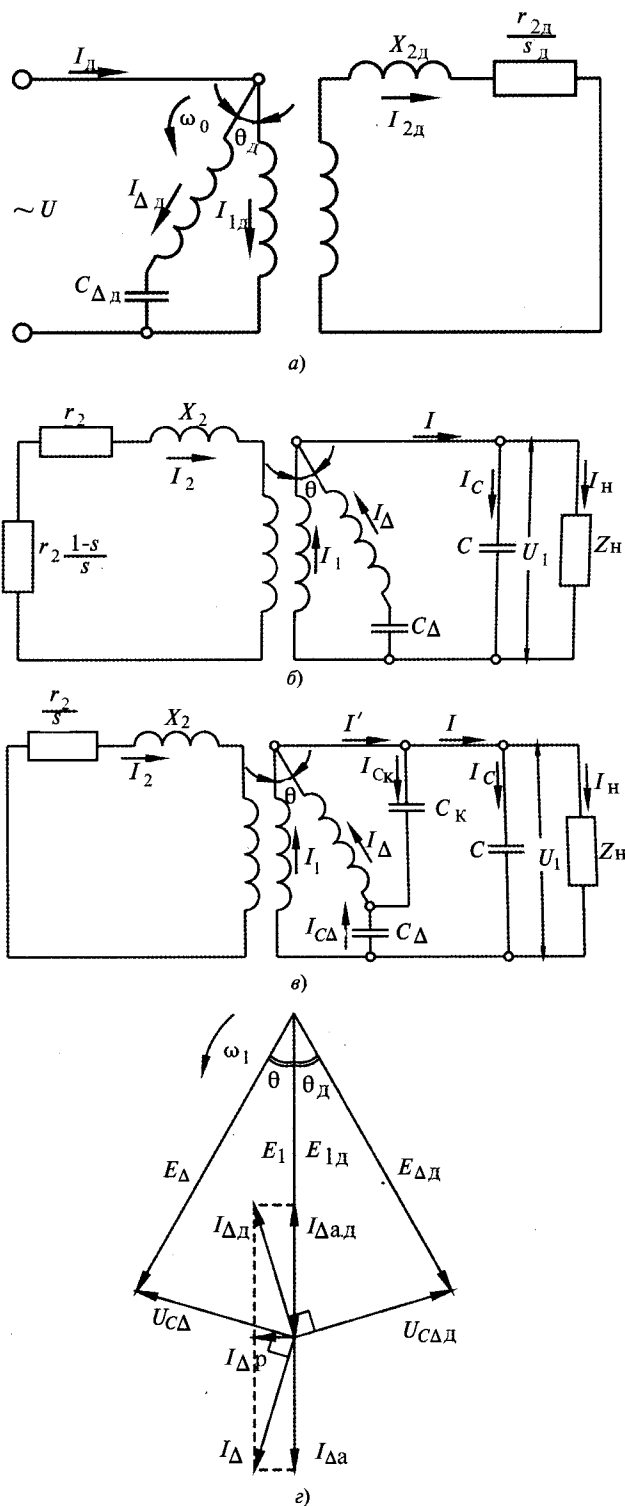


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы фазы КАМ: а – КАД; б – КААГ; в – обобщённого КААГ с двойным внутренним ёмкостным возбуждением; г – фрагмент совмещённой вектор-

вращения поля [6]. Тогда ЭДС \dot{E}_Δ будет отставать по фазе от \dot{E}_1 на угол θ , т.е. $\theta = -30^\circ$ (рис. 1, б, в, г, 2). Изменяются на 150° направления векторов напряжений $\dot{U}_{C\Delta d}$ и $\dot{U}_{C\Delta}$, тока \dot{I}_Δ (рис. 1, г). Активные составляющие этого

тока $\dot{I}_{\Delta a.d}$ и $\dot{I}_{\Delta a}$ встречны, а реактивные $\dot{I}_{\Delta p}$ неизменны, что соответствует условиям перехода КАМ из двигательного режима в генераторный (рис. 1, а, б, в). Т.е. условием перевода КАМ из режима двигателя в генераторный является смена знаков скольжения s и угла θ пространственного сдвига между обмотками поворотного АГ статора. Реально это можно сделать при отключении машины от сети с последующим включением её при $\theta < 0$.

Но удобнее это выполнить независимо от сети, для автономного режима генератора. Принципиальная электрическая схема фазы КААГ приведена на рис. 1, б, а его векторная диаграмма – на рис. 2, а.

Как и обычный ААГ, он работает на принципе ёмкостного самовозбуждения, но получая реактивную мощность от внешней ёмкости C и внутренней C_{Δ} . Активную мощность генератор получает в виде механической мощности с вала приводного двигателя, электрический эквивалент которой в цепи ротора $P_{mx} = mI_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}$ электромагнитным путём передаётся в цепь статора на нагрузку $z_H = r_H + jx_H$ и расходуется на неизбежные в процессе преобразования энергии потери.

Расчётные уравнения электрического равновесия контуров фазы КААГ по рис. 1, б представляются в виде:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 z_1 - jx_1 \cos\theta \dot{I}_{\Delta} = \dot{I} z; \\ \dot{U} &= \dot{U}_{\Delta} - \dot{U}_{C\Delta} = \dot{E}_{\Delta} - \dot{I}_{\Delta} z_{\Delta} - jx_1 \cos\theta \dot{I}_1 + jx_{C\Delta} \dot{I}_{\Delta}; \quad (2) \\ 0 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2, \end{aligned}$$

где $z_1 = z_{\Delta} = r_1 + jx_1$ – внутренние сопротивления одинаковых обмоток статора; r_1, x_1 – активное и индуктивное сопротивления рассеяния каждой обмотки [7] (при разделении единой обмотки фазы статора на две, сдвинутые между собой на угол θ обмотки, между ними сохраняется и сопротивление $x_1 \cos\theta$ взаимной связи по полю рассеяния); $z_2 = \frac{r_2}{s} + jx_2$ – сопротивление фазы ротора с активной r_2 и реактивной x_2 составляющими [7]; $z = \frac{-jx_C z_H}{z_H - jx_C}$ – сопротивление на-

грузки $z_H = r_H + jx_H$; $x_C = \frac{1}{\omega C}$ – сопротивление внешней ёмкости C ; $x_{C\Delta} = \frac{1}{\omega C_{\Delta}}$ – сопротивление ёмкости C_{Δ} ; ω – угловая скорость вращения ротора, в машине с приведением ротора к стато-

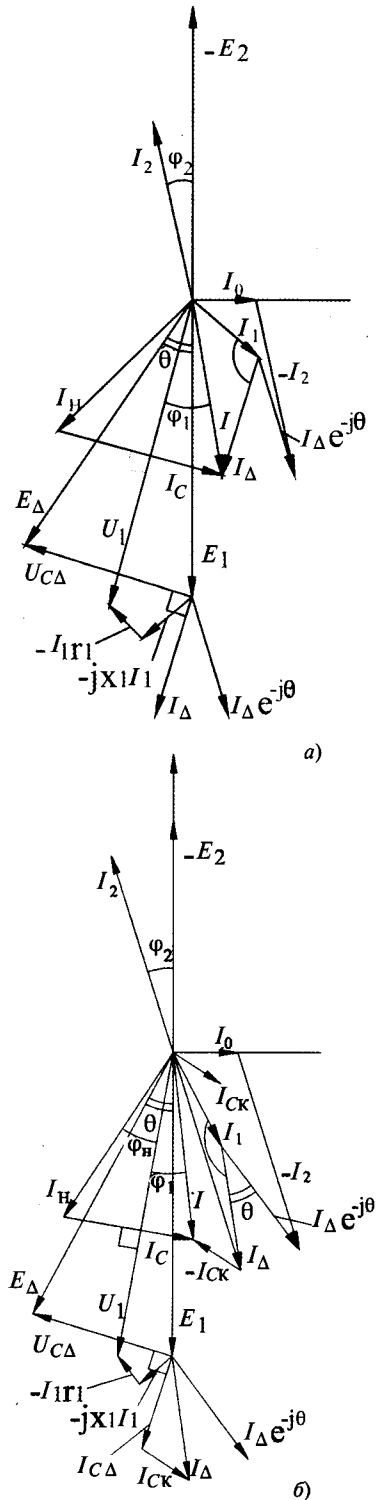


Рис. 2. Векторные диаграммы фазы: а – КААГ; б – ОКААГ

ру [1,2] угловые скорости поля статора ω_1 и ротора ω одинаковы; s – расчётное значение скольжения реальной машины; $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jx_m \dot{I}_0$ – ЭДС основной обмотки статора и приведённого к нему ротора; $\dot{E}_{\Delta} = \dot{E}_1 e^{j\theta}$ – ЭДС дополнительной обмотки статора; x_m – сопротивление намагничивающего контура машины [7].

В процессе вывода расчётных соотношений удобно систему уравнений (3) заменить уравнениями связи рабочих токов $\dot{I}_1, \dot{I}_\Delta$ с главным энергетическим параметром генератора – ЭДС E_1 основной обмотки статора:

$$\begin{aligned} a\dot{E}_1 &= b\dot{I}_1 + c\dot{I}_\Delta; \\ d\dot{E}_1 &= e\dot{I}_1 + f\dot{I}_\Delta, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\dot{I}_1 = \gamma\dot{E}_1, \dot{I}_\Delta = \Delta\dot{E}_1$; $a, b, c, d, e, f, \gamma, \Delta$ – параметрические коэффициенты,

$$\begin{aligned} a &= 1; \quad b = z_1 + z; \quad c = z + jx_1 \cos\theta; \quad d = e^{j\theta}; \\ e &= z + jx_1 \cos\theta; \quad f = z_1 + z - jx_{C\Delta}; \\ \gamma &= \frac{af - cd}{bf - ce}; \quad \Delta = \frac{bd - ae}{bf - ce}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выразив в (1) все токи через основную ЭДС ($\dot{I}_1 = \gamma\dot{E}_1, \dot{I}_\Delta = \Delta\dot{E}_1$):

$$\dot{I}_0 = j \frac{\dot{E}_1}{x_m}; \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{z_2} = \frac{\dot{E}_1}{z_2} \quad (5)$$

и сократив в (1) обе части на E_1 , получим уравнение равновесия параметров:

$$\gamma + \Delta e^{-j\theta} = \frac{j}{x_m} - \frac{1}{r_2/s + jx_2}. \quad (6)$$

Представив комплекс $\gamma + \Delta e^{-j\theta} = \alpha_a + j\alpha_1$, где α_a – действительное число, α_1 – мнимое число комплекса, и выделив из (6) действительную и мнимую составляющие, получим:

$$\begin{aligned} \alpha_a &= -\frac{r_2/s}{(r_2/s)^2 + x_2^2}; \\ j\alpha_1 &= -\frac{j}{x_m} + \frac{jx_2}{(r_2/s)^2 + x_2^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

откуда $\frac{r_2}{s} = \frac{-1 - \sqrt{1 - 4\alpha_a^2 x_2^2}}{2\alpha_a}$ и $s < 0$. При подстановке найденного значения r_2/s во второе выражение (7) находим x_m .

Так, при заданных нагрузке (z_H), собственных (r_1, x_1, r_2, x_2) и вносимых ($x_C, x_{C\Delta}$) параметрах генератора определяют соответствующие им переменные параметры генератора s и x_m .

По характеристике намагничивания АМ [7, 8] $E = f(I_0)$ и зависимости $E = \varphi(x_m)$ (рис. 3) по x_m находят ЭДС $E = E_1$, соответствующую заданному режиму работы генератора.

Для возможности машинного расчёта характеристику намагничивания (рис. 3) аппрок-

симируют непрерывной функцией, например, полиномом $I_0 = a_1 E + b_1 E^3 + c_1 E^5$ или более простым выражением

$$\frac{I_0}{E} = \frac{1}{x_m} = a_1 + b_1 E^2 + c_1 E^4, \quad (8)$$

где a_1, b_1, c_1 – коэффициенты аппроксимации в предполагаемой области изменения E в кривой рис. 3.

После определения основной ЭДС E_1 по (5) находят все токи, по (2) напряжения, затем

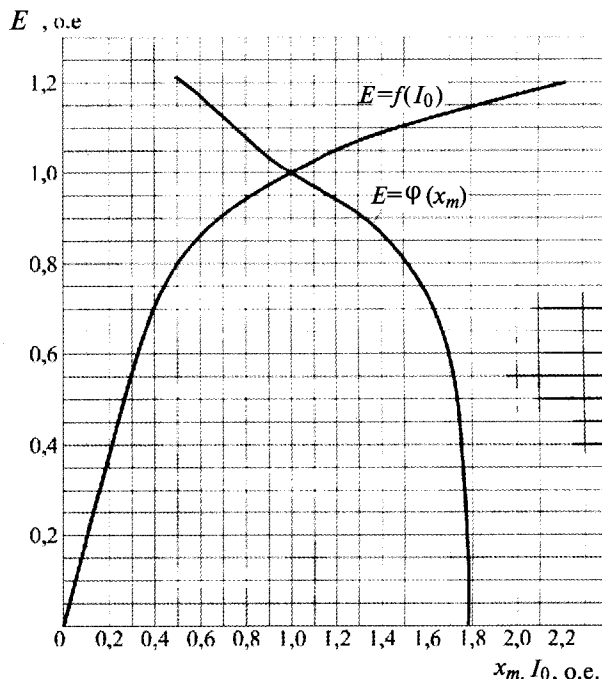


Рис. 3. Типовая характеристика намагничивания $E = f(I_0)$ и кривая зависимости $E = \varphi(x_m)$ асинхронных машин малой мощности (до 10–11 кВт)

другие необходимые величины, строят соответствующие графики зависимостей, проводят их анализ.

Предложенная методика определения s, x_m в отличие от [3] имеет обобщённый характер, т.е. справедлива не только для КААГ, но и для других генераторов, отличающихся видом ёмкостной компенсации реактивной мощности. Например, в базовом ААГ только при внешней ёмкостной компенсации с $x_C \neq 0$ при расчёте параметрических коэффициентов (4) принято $\theta = 0, x_{C\Delta} = 0, \dot{I}_1 = \dot{I}_\Delta$. В последующем при исследовании обобщённого компенсированного генератора (ОКААГ) тоже будут приняты соответствующие поправки к определению параметрических коэффициентов.

Результаты расчёта КААГ и ОКААГ иллюстрируются векторными диаграммами рис. 2, а, б и характеристиками рис. 4, 5. Наи-

большой интерес представляют внешние характеристики $U_1 = f(I_H)$ – зависимости напряжения U_1 на выходе генератора от тока нагрузки I_H при изменении сопротивления нагрузки $z_H = \text{var}$ и $\cos \varphi_H = 0,8 = \text{const}$. Для сравнения на рис. 4 приведены внешние характеристики ААГ при $x_C = 100$ Ом, КААГ ($\theta = -30^\circ$) при $x_C = 100$, $x_{C\Delta} = 100$ Ом и ОКААГ при $x_C = 100$, $x_{C\Delta} = 100$ Ом, $x_{CK} = 200$ Ом. Генераторы построены на базе АД 4А71В2 [7].

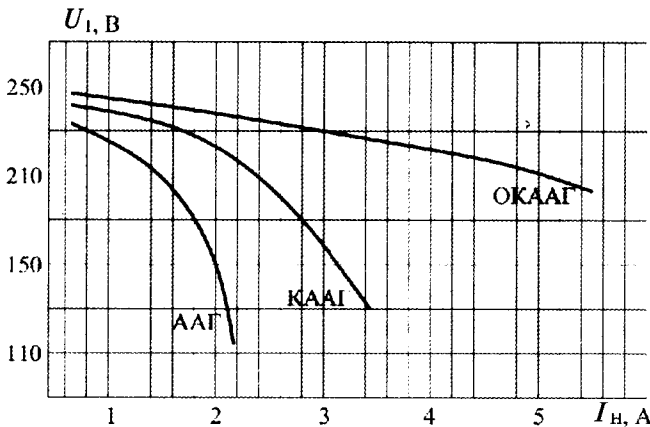


Рис. 4. Внешние характеристики автономных асинхронных генераторов с внешним (ААГ), смешанным (КААГ) и дополнительным (ОКААГ) ёмкостным возбуждением

В базовом ААГ с ростом нагрузки напряжение и частота резко падают [1,3] вследствие размагничивающего действия реактивной составляющей тока нагрузки при $x_C = \text{const}$. Несмотря на рост тока нагрузки, реактивный ток самого генератора и его общий ток падают.

В КААГ с внутренней ёмкостной компенсацией рост нагрузки сопровождается, как и в ААГ, некоторым уменьшением индуктивной составляющей тока I_1 основной обмотки, но ёмкостно-активный ток I_Δ дополнительной обмотки статора при нагрузке растёт. Проходя через ёмкость C_Δ на выходе АТ, он несколько увеличивает выработку реактивной мощности, что в какой-то мере препятствует размагничиванию генератора, снижает падение напряжения в нём. Характеристики КААГ становятся более жёсткими, чем в ААГ, увеличивается диапазон устойчивой работы генератора по току нагрузки.

На рис. 5 показаны возможности выбора в КААГ наиболее благоприятного соотношения между x_C и $x_{C\Delta}$ для обеспечения постоянного заданного напряжения $U_1 = 230$ В на выходе генератора при постоянной нагрузке, при $z_H = 100$ Ом, $\cos \varphi_H = 0,8$. Так, при $x_C = 102$ Ом, $x_{C\Delta} = 60$ Ом токи I_1 и I_Δ обмоток статора равны, что обеспечивает одинаковый тепловой режим. Расход реактивной мощности на воз-

буждение генератора и на создание его поля рассеяния минимален и составляет $\theta_r = 330$ вар при собственном коэффициенте мощности $\cos \varphi_r = 0,904$. ААГ при тех же нагрузке и напряжении требует реактивную мощность 386 вар при $\cos \varphi = 0,745$. Индуктивно-активный ток I_1 основной обмотки статора и ёмкостно-активный ток I_Δ дополнительной обмотки при непосредственной электрической связи между ними создают общий ток генератора $I = I_1 + I_\Delta$ (см. рис. 1,б, 2,а), близкий к активному с $\cos \varphi_r \geq 0,9$.

С другой стороны, ёмкостный по сути ток I_Δ в приведённом к оси основной обмотки виде $I_\Delta e^{-j\theta}$ принимает долевое участие в создании намагничивающего тока $I_0 = I_1 + I_\Delta e^{-j\theta} + I_2$, т.е., как и индуктивный, оказывает подмагничивающее действие на систему. Электромагнитный характер действия этого тока в АТ схемы проявляется в создании дополнительной ЭДС $E_{\Delta m} = -jx_m I_\Delta e^{-j\theta}$, которая увеличивает основную ЭДС, что поддерживает уровень напряжения в генераторе с ростом нагрузки. Двойное действие тока I_Δ , непосредственно

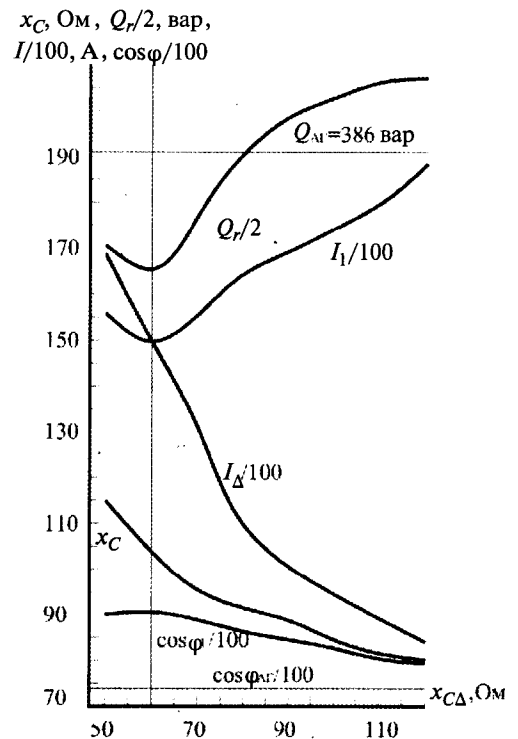


Рис. 5. Графики зависимости от сопротивления $x_{C\Delta}$ внутренней ёмкостной компенсации токов I_1 , I_Δ обмоток статора, реактивной мощности Q_r , коэффициента мощности $\cos \varphi$, сопротивления x_C внешней ёмкости КААГ, выполненных на базе АД 4А71В2, при постоянном сопротивлении нагрузки $Z_H = (80 + j60)$ Ом и постоянном напряжении $U = 230$ В

влияющего на повышение $\cos\varphi$ генератора и подмагничивающего систему, создаёт возможность значительного (на 15–20%) снижения расхода реактивной мощности на возбуждение генератора.

Однако противоположный характер реактивных составляющих токов \dot{I}_1 и \dot{I}_Δ несколько увеличивает угол (во времени) между ними и значения самих токов (см. рис. 2,а). С повышением $x_{C\Delta}$ этот сдвиг между токами несколько уменьшается, но изменяются значения токов: \dot{I}_Δ падает, \dot{I}_1 растёт.

Шунтирование вторичной обмотки АТ дополнительной ёмкостью C_k (рис. 1,в) может восстановить равенство этих токов и сблизить их векторы между собой. Так как вторичная обмотка АТ имеет напряжение U_Δ , близкое по значению к общему напряжению U_1 генератора, то при шунтировании её требуется относительно малая ёмкость C_k . Её ток $\dot{I}_{Ck} = \frac{\dot{U}_\Delta}{-jx_{Ck}} \approx \frac{\dot{E}_\Delta}{-jx_{Ck}}$ опережает \dot{E}_Δ на 90° . Ток

ёмкости C_Δ по-прежнему равен $\dot{I}_{C\Delta} = \frac{\dot{U}_{C\Delta}}{-jx_{C\Delta}}$, а

ток вторичной обмотки $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{C\Delta} + \dot{I}_{Ck}$ возрастает, меняет фазу и, будучи приведённым к оси основной обмотки $\dot{I}_\Delta e^{-j\theta}$, в соответствии с $\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2$ уменьшает ток \dot{I}_1 и сближает его по фазе с \dot{I}_Δ (рис. 2,б), а также увеличивает основную ЭДС E_1 , напряжение генератора и повышает жёсткость внешней характеристики, что может применяться для форсировки напряжения при набросе нагрузки.

Такой вариант КААГ с внешним ($C \sim x_C$) и двойным внутренним ($C \sim x_\Delta$, $C_k \sim x_{Ck}$) ёмкостным возбуждением является обобщённым вариантом КААГ–ОКААГ.

КААГ может стать достойным конкурентом синхронному в автономных системах электропитания. По сравнению с базовым АГ он требует меньшую (на 15–20%) реактивную мощность для своего возбуждения, обеспечивает большую жёсткость внешней характеристики (падение напряжения в пределах до номинальной нагрузки не превышает 5%), позволяет осуществлять форсировку напряжения

при набросе нагрузки, что повышает устойчивость совместной работы генератора и двигателя, например в процессе пуска и разгона АД в автономном электромеханическом комплексе с компенсированными АМ соизмеримой мощности.

Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.
2. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2002.
3. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М.: Высшая школа, 1982.
4. Мишин В.И., Чуенко Р.Н., Гаврилюк В.В. Эффект внутренней ёмкостной компенсации реактивной мощности в асинхронном электродвигателе// Электротехника. 2009. №8. С. 30–36.
5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001.
6. Пат. №83730 С2 Украина. Автономный асинхронный генератор /Мишин В.И., Каплун В. В., Макаревич С. С. та ін.// Бюл. 2008. №15.
7. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоиздат, 1982.
8. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. М.: Высшая школа, 1977.
9. Мишин В.И., Собор И.В. Моделирование аварийных режимов электродвигателей в сельском хозяйстве. Кишинев: Штиинца, 1991.

Мишин Владимир Иванович – профессор кафедры электрических машин и эксплуатации электрооборудования Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, доктор техн. наук, заслуженный деятель науки и техники Украины. Окончил Горьковский политехнический институт в 1954 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Управляемые дроссели с улучшенной формой кривой регулируемого тока» в 1966 г., – докторскую диссертацию по теме «Статические ферромагнитные устройства с вращающимся магнитным полем» в 1974 г.

Каплун Виктор Владимирович – директор научно-исследовательского института электроэнергетических систем Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, доктор техн. наук. Окончил Украинскую сельскохозяйственную академию в 1987 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Эксплуатационный контроль контактных соединений сельских электроустановок термочувствительными устройствами с эффектом памяти формы» в 2002 г., – докторскую диссертацию по теме «Автономные системы электропитания сельскохозяйственных потребителей с разнородными источниками электроэнергии» в 2009 г.

Макаревич Светлана Сергеевна – ассистент кафедры электропитания имени профессора В.М. Синькова. Окончила магистратуру факультета электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства Национального аграрного университета в 2001 г.

Тепловая модель асинхронного двигателя для целей релейной защиты

БУЛЫЧЁВ А.В., ЕРОХИН Е.Ю., ПОЗДЕЕВ Н.Д., ФИЛИЧЕВ О.А.

Рассмотрены проблемы защиты асинхронного двигателя от перегрева статорной обмотки и недостатки тепловой модели с одной постоянной времени. С использованием метода тепловых схем построена тепловая модель асинхронного двигателя, содержащая пять активных элементов. Показана целесообразность её применения при построении алгоритмов защиты асинхронного двигателя от тепловой перегрузки.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тепловая модель, релейная защита.

Стремление максимально полно использовать перегрузочные возможности электродвигателей и вместе с этим избежать внезапных возмущений электроэнергетических систем при их повреждениях вызывает необходимость совершенствования защит, устанавливаемых на электродвигателях, в части реализации упреждающих функций. Совершенство защиты, в свою очередь, во многом определяется степенью совершенства математической модели контролируемого защитой объекта, положенной в основу принципа действия защиты. В связи с этим, разработка более полной и точной модели нагрева асинхронного электродвигателя (АД) для реализации в цифровых системах релейной защиты является важной и актуальной научно-технической задачей.

Наиболее уязвимым элементом АД является изоляция обмоток статора. С её разрушением связано подавляющее большинство аварий двигателей. При высоких температурах изоляция особенно быстро стареет, теряет электрическую и механическую прочность. При этом возникают благоприятные условия для электрического пробоя и возникновения КЗ. Поэтому в защите АД важно контролировать параметры, характеризующие состояние изоляции, а не состояние машины в целом.

Основным источником тепла в АД являются потери в обмотке статора. Нагрев происходит, в основном, за счёт энергии, выделяющейся в проводниках с током. Кроме этого тепло выделяется в стали (магнитные потери) и во вращающихся элементах машины (механические потери) [1].

Problems of protection of an induction motor against overheat of its stator winding and disadvantages of the thermal model with a single time constant are considered. The thermal model containing five active elements is formed using the method of thermal circuits and it is shown that application of the model is reasonable in algorithms of the thermal overload protection of an induction motor.

Key words: induction motor, thermal model, relay protection.

Распределение температуры в каком-либо теле с математической точки зрения – функция места и времени. Связь пространственных и временных изменений температуры твёрдого тела, когда в нём действует внутренний источник тепла, устанавливает общее уравнение теплопроводности, выведенное Фурье [2]:

$$c\rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} + q_v, \quad (1)$$

где c – удельная теплоёмкость тела; ρ – плотность материала тела; ϑ – температура тела; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – коэффициенты теплопередачи в направлении координатных осей; q_v – удельное количество тепла, выделяемое или поглощаемое в единицу времени в единице объёма.

Для изотропного тела, когда $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{q_v}{c\rho} + a\nabla^2 \vartheta.$$

Здесь $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – температуропроводность; ∇ – оператор векторного дифференцирования.

При отсутствии теплопроводности ($\lambda=0$) имеет место адиабатный процесс. Приняв эту идеализацию, можно получить известный критерий для контроля перегрузок:

$$A = I_*^2 t = \text{const},$$

который используется во многих защитах генераторов и электродвигателей (здесь I_* – относительное значение тока перегрузки).

Для высокотеплопроводного тела ($\lambda \rightarrow \infty$) уравнение преобразуется в известное уравнение нагрева для однородного тела с бесконечно большой теплопроводностью в охлаждающей среде, имеющей бесконечно большую теплоёмкость:

$$\Delta P = \alpha_T F \vartheta_c + cG \frac{d\vartheta_c}{dt},$$

где ΔP – мощность, расходуемая на нагрев; α_T – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности тела; G – масса тела; ϑ_c – превышение температуры тела над температурой окружающей среды.

Последнее уравнение даёт возможность в ряде случаев строить защиты от перегрузки, обеспечивающие более полное использование перегрузочных способностей защищаемой машины.

Аналитическое решение последнего уравнения для процесса нагрева можно представить в следующем виде:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_y (1 - e^{-t/\tau}) + \Delta\vartheta_0 e^{-t/\tau}, \quad (2)$$

где τ – постоянная времени нагрева; $\Delta\vartheta_y$ – превышение температуры, соответствующее установившемуся тепловому режиму; $\Delta\vartheta_0$ – превышение температуры тела над температурой окружающей среды в начальный момент нагрева.

Для процесса охлаждения ($\Delta P = 0$) решение имеет вид:

$$\vartheta_c = \vartheta_H e^{-\frac{t}{\tau_0}},$$

где ϑ_H – превышение температуры в начале процесса охлаждения; τ_0 – постоянная времени, соответствующая режиму охлаждения.

Идеализации, принятые при этом, не оказывают существенного влияния на точность моделирования кратковременных процессов нагрева и охлаждения машин. Однако при длительных процессах (особенно в случаях повторно-кратковременных режимов работы двигателей) погрешности моделирования накапливаются и точность воспроизведения процессов снижается по мере увеличения их длительности [3].

Более точную модель нагрева АД для целей релейной защиты можно построить на основе тепловых схем замещения [4]. Метод основан на аналогии тепловых и электрических потоков и тепловых и электрических сопротивлений.

АД представляется как совокупность отдельных элементов (тел), каждый из которых имеет свой источник тепла (активный элемент): обмотки, магнитопровод и механические узлы. Отдельные элементы, которые можно рассматривать как однородные тела, связаны между собой тепловыми эквивалентными сопротивлениями. Таким образом, обеспечивается возможность с достаточно высокой точностью определять температуру каждого элемента и учитывать взаимное влияние всех элементов машины на тепловое состояние.

В тепловой схеме замещения электрическую машину представляют системой тел, соответствующих отдельным частям машины, соединённых между собой и с местами отвода тепла тепловыми сопротивлениями. Точность теплового расчёта определяется не только количеством узловых точек, но в большей степени зависит от точности оценки параметров (коэффициентов теплоотдачи, теплопроводности выбранных материалов и других факторов).

На рис. 1 изображена в общем виде эквивалентная тепловая схема АД с привязкой параметров к основным элементам машины. На схеме приняты следующие обозначения:

$P_1 - P_5$ – источники тепла в электрической машине (P_1 – потери в стали ($P_{ст}$); P_2 – потери в пазовой части обмотки статора ($P_{паз}$); P_3 – потери в лобовых частях обмотки статора ($P_{лоб}$); P_4 – потери в роторе ($P_{рот}$); P_5 – механические потери ($P_{мех}$)); $R_1 - R_{23}$ – тепловые сопротивления материалов элементов АД.

Тепловые потоки между отдельными телами с внутренними источниками тепла создают перепады температуры на тепловых сопротивлениях.

Более формализованная эквивалентная тепловая схема замещения АД с короткозамкнутым ротором показана на рис. 2.

Здесь использованы следующие обозначения: T_0 – температура окружающей среды; T_1 – температура корпуса двигателя; T_2 – температура ротора; T_3 – температура пазовой части обмотки статора; T_4 – температура стали статора; T_5 – температура лобовой части обмотки статора; $R_{охл}$ – тепловое сопротивление системы охлаждения машины; $R_{ст} = R_{\lambda 3} + R_{\alpha 3}$ – тепловое сопротивление стали статора ($R_{\lambda 3}$ – составляющая теплового сопротивления в сторону расточки статора, $R_{\alpha 3}$ – конвективная составляющая сопротивления в сторону расточки); $R_{паз}$ – тепловое сопротивление пазовой части обмотки статора; $R_{медь}$ – тепловое со-

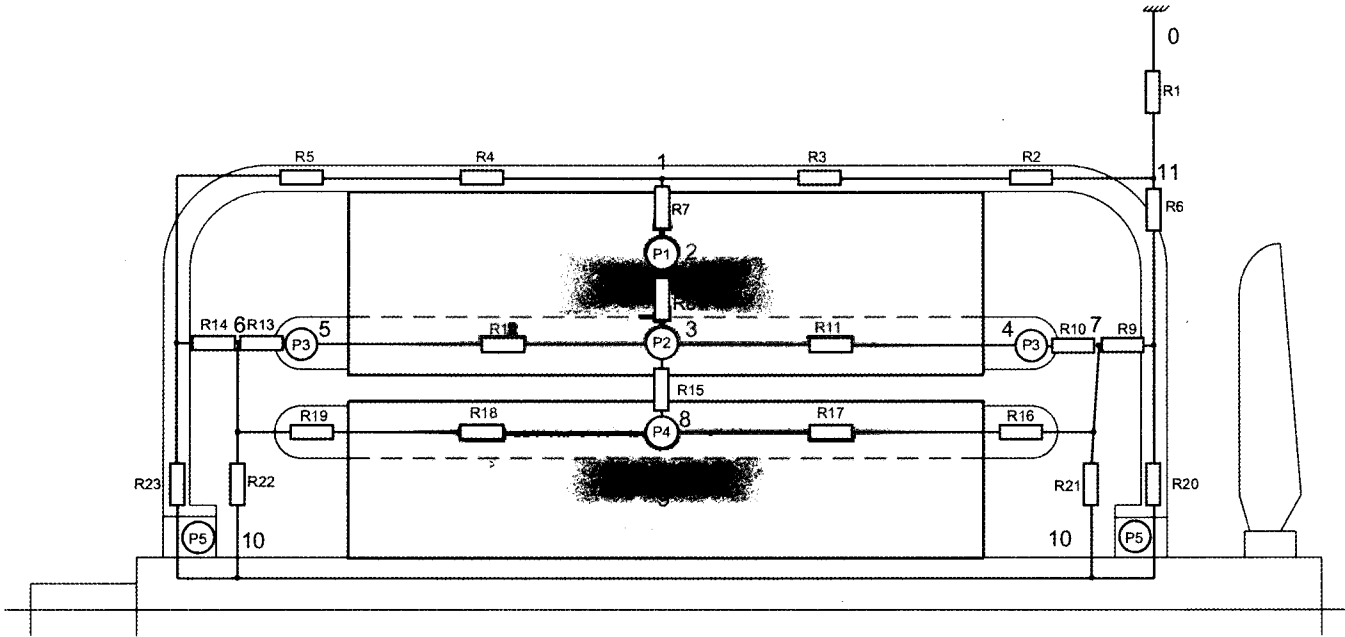


Рис. 1

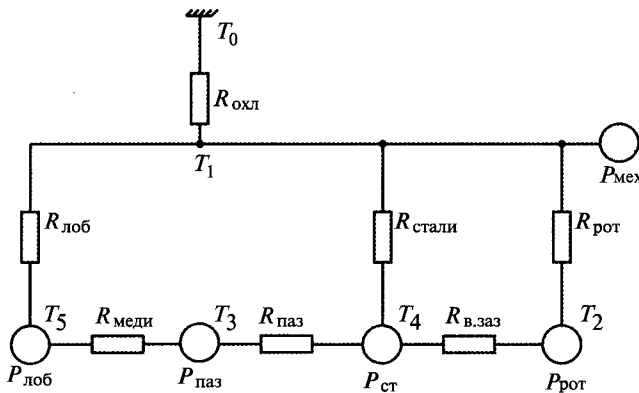


Рис. 2

противление меди обмотки статора; $R_{\text{лоб}} = R_K + R_{\text{возд}}$ – тепловое сопротивление лобовой части обмотки статора (R_K – тепловое сопротивление конвекции в зоне лобовых частей обмотки, $R_{\text{возд}}$ – тепловое сопротивление воздуха вокруг машины); $R_{\text{в.заз}}$ – тепловое сопротивление воздушного зазора; $R_{\text{рот}}$ – тепловое сопротивление стали ротора.

Определение указанных тепловых параметров – предмет отдельного исследования. Например, возможен экспериментальный подход к решению этой задачи [5].

Для каждого элемента составляется уравнение теплового баланса. Все уравнения объединяются в систему.

Система уравнений теплового баланса, учитывающая тепловые свойства каждого элемента АД, имеет следующий вид:

$$\begin{cases}
 C_1 \left(\frac{d}{dt} T_1 \right) + T_1 \left(\frac{1}{R_{\text{корп}}} + \frac{1}{R_{\text{лоб}}} + \frac{1}{R_{\text{ст}}} \right) - T_0 \frac{1}{R_{\text{корп}}} - T_4 \frac{1}{R_{\text{лоб}}} - T_2 \frac{1}{R_{\text{ст}}} = 0; \\
 C_2 \left(\frac{d}{dt} T_2 \right) + T_2 \left(\frac{1}{R_{\text{паз}}} + \frac{1}{R_{\text{ст}}} \right) - T_3 \frac{1}{R_{\text{паз}}} - T_1 \frac{1}{R_{\text{ст}}} = P_{\text{ст}}; \\
 C_3 \left(\frac{d}{dt} T_3 \right) + T_3 \left(\frac{1}{R_{\text{медь}}} + \frac{1}{R_{\text{паз}}} \right) - T_4 \frac{1}{R_{\text{медь}}} - T_2 \frac{1}{R_{\text{паз}}} = \frac{P_{\text{эл}}}{3}; \\
 C_4 \left(\frac{d}{dt} T_4 \right) + T_4 \left(\frac{1}{R_{\text{лоб}}} + \frac{1}{R_{\text{медь}}} \right) - T_1 \frac{1}{R_{\text{лоб}}} - T_3 \frac{1}{R_{\text{медь}}} = \frac{2P_{\text{эл}}}{3}; \\
 C_5 \left(\frac{d}{dt} T_5 \right) + T_5 \left(\frac{1}{R_{\text{рот}}} \right) - T_1 \frac{1}{R_{\text{рот}}} = P_{\text{рот}},
 \end{cases} \quad (3)$$

где C_1 – теплоёмкость корпуса двигателя; C_2 – теплоёмкость стали статора; C_3 – теплоёмкость пазовой части обмотки статора; C_4 – теплоёмкость лобовых частей обмотки статора; C_5 – теплоёмкость ротора; $P_{\text{эл}}$ – суммарные потери в обмотке статора.

Каждое из этих дифференциальных уравнений описывает характер изменения температуры элемента АД во времени. Решив систему дифференциальных уравнений, получим значения температуры элементов машины.

Таким образом, система уравнений (3) представляет собой тепловую модель АД с короткозамкнутым ротором.

При реализации алгоритмов защиты систему уравнений можно упростить за счёт использования доступных для измерения величин. Например, задавая реальные значения температуры корпуса АД, первое уравнение системы (3) можно исключить. Для этого на корпусе двигателя необходимо установить датчик температуры и использовать реальные данные в процессе вычислений.

В качестве примера на рис. 3 показаны кривые изменения температуры отдельных элементов двигателя (АИР100S4 с номинальной мощностью 3 кВт) в номинальном режиме из исходного отключённого состояния.

Как видно, наибольшую температуру имеют лобовые части обмотки статора, несколько меньше температура пазовой части обмотки статора, что объясняется лучшими условиями отвода тепла.

Для определения степени детализации тепловой модели на основе предложенного метода было проведено моделирование тепловых процессов для моделей с различным количеством элементов. При увеличении количества элементов (количества уравнений системы) увеличивается точность вычислений, но вместе с этим растёт время решения системы. Установлено, что оптимальное соотношение точности и времени вычисления обеспечивается при использовании модели, содержащей 5 элементов. Это число определяется количеством

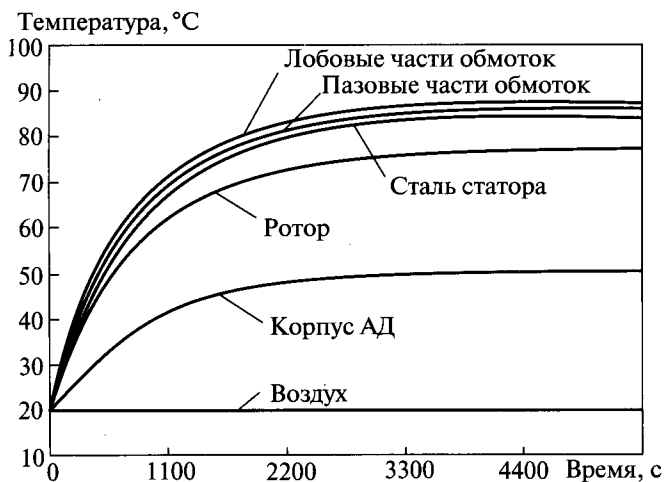


Рис. 3

активных элементов АД, параметры теплообмена которых постоянны по всему их объёму, что позволяет считать их (с приемлемыми для релейной защиты допущениями) однородными телами.

Изменение температуры элементов АД при охлаждении в отключённом состоянии из исходного номинального режима показано на рис. 4.

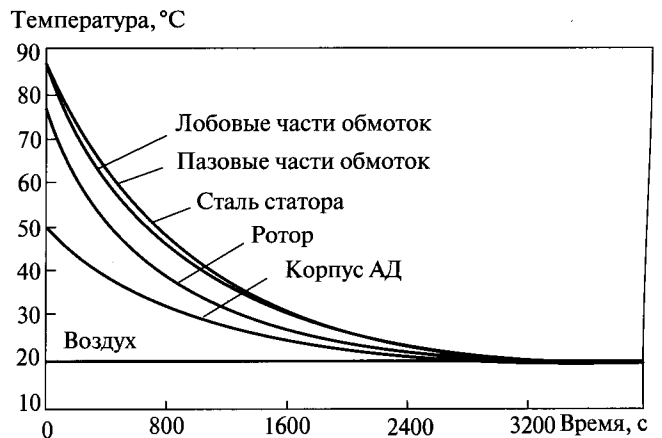


Рис. 4

Наиболее характерным режимом работы многих АД является повторно-кратковременный, который состоит из последовательных циклов нагрева и охлаждения. Конечная температура интервала нагрева является начальной для интервала охлаждения. На рис. 5 показаны процессы изменения температуры элементов машины при повторно-кратковременном режиме работы.

Для проверки адекватности разработанной тепловой модели проведены лабораторные испытания АД АИР100S4 с целью получения тепловых характеристик обмотки статора. Для этого в АД на лобовую и пазовую части обмотки статора были установлены датчики температуры марки ММТ-1 (терморезистор). Измерения проводились при нормальных параметрах окружающей среды (температура +20°C; атмосферное давление 750 мм; влажность 85%).

Полученная в ходе эксперимента кривая нагрева обмотки статора АД АИР100S4 и кривые нагрева обмоток для отдельной и пятилетней тепловой модели представлены на рис. 6.

Анализ данных показал, что разность температур, полученных расчётным путём на основе модели, учитывающей пять активных элементов, и измеренных с помощью датчиков, в установившемся режиме не более 1,5 °C, что составляет 1,7% действительного

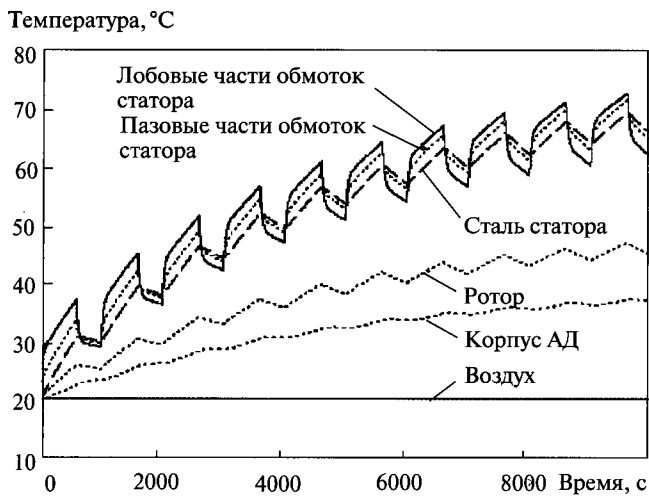


Рис. 5

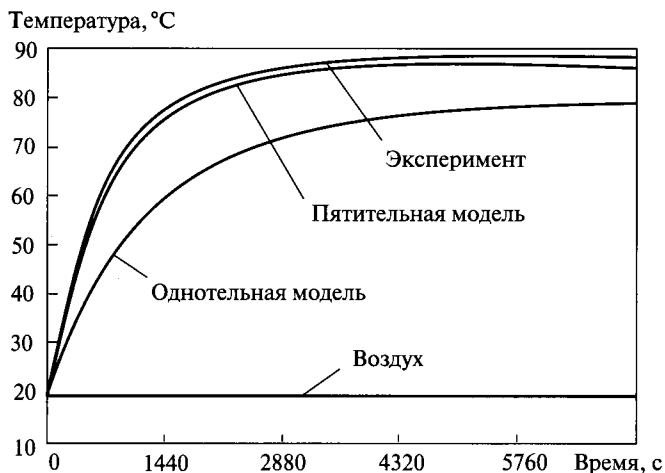


Рис. 6

значения. Для одноэлементной тепловой модели отклонение значения температуры от действительной составляет 9,5 °С (более 10%).

Кривая нагрева обмотки статора АД и расчётные кривые для повторно-кратковременного режима работы представлены на рис. 7.

В этом режиме характеристика пятиэлементной тепловой модели расположена достаточно близко к экспериментальной кривой нагрева обмотки. При этом следует отметить, что с увеличением времени работы АД, погрешность расчёта температуры обмотки статора не увеличивается, т.е. нет эффекта накопления ошибки.

Выводы

Проведены исследования, позволившие установить, что при построении защиты от пе-

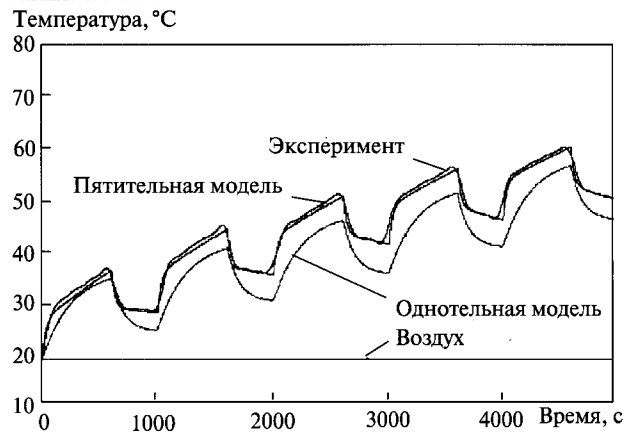


Рис. 7

регрузки АД целесообразно использовать тепловую модель, содержащую пять элементов (по числу активных элементов АД, параметры теплообмена которых с приемлемой для релейной защиты точностью можно считать постоянными по всему объёму).

Список литературы

1. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2008.
2. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. Пер. с нем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.
3. Булычев А.В., Езерский В.Г., Захаров О.Г., Поздеев Н.Д. Исследование цифровых устройств серии БМРЗ-Д для защиты электродвигателей на физической модели // Энергетик. 2006. №3. С. 19–22.
4. Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. Л.: Энергия, 1974.
5. Бугаев Г.А., Ерохин Е.Ю. Определение параметров тепловой модели асинхронного электродвигателя // Труды АЭН Чувашской Республики. 2002. №2. С. 21–26.

Булычёв Александр Витальевич – заместитель генерального директора по науке ОАО «ВНИИР», доктор техн. наук, профессор. Окончил электроэнергетический факультет Вологодского политехнического института в 1980 г.

Ерохин Евгений Юрьевич – заведующий отделом инжиниринга гибких систем передачи переменного тока ОАО «ВНИИР». Окончил факультет радиоэлектроники и информатики Чувашского ГУ им. И.Н. Ульянова в 1997 г.

Поздеев Николай Дмитриевич – заведующий кафедрой «Электроснабжение» Вологодского ГТУ, канд. техн. наук. Окончил электроэнергетический факультет Вологодского политехнического института в 1987 г.

Филичев Олег Алексеевич – главный энергетик ООО «Проектстройэкспертиза». Окончил электроэнергетический факультет Вологодского ГТУ в 2006 г.

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЗАЩИТЫ

Развитие высокочувствительной защиты дальнего резервирования

ВАСИЛЬЕВ Д.С., ЕРЕМЕЕВ Д.Г., ПАВЛОВ А.О.

Представлены результаты исследования, направленного на повышение чувствительности дистанционных защит линий и обеспечения селективного отключения при трудно распознаваемых замыканиях в силовых трансформаторах и на стороне низшего напряжения ответственных подстанций.

Ключевые слова: дальнее резервирование, ответственная подстанция, силовой трансформатор.

Защита дальнего резервирования устанавливается на головных концах линий электропередачи 110–220 кВ и обеспечивает выявление КЗ в силовых отпаечных трансформаторах и на стороне низшего напряжения.

Начало разработке микропроцессорной защиты дальнего резервирования было положено на кафедре ТОЭ и РЗА Чувашского ГУ в 1998 г. по инициативе начальника службы РЗА Витебскэнерго С.В. Безбожной и известного специалиста ВНИИР, заведующего кафедрой ТОЭ и РЗА профессора Г.С. Нудельмана. За истекшее время разработано несколько модификаций защиты, накоплен опыт эксплуатации и начато серийное производство в НПП «Бреслер».

При реализации дальнего резервирования защит трансформаторов ответственных подстанций возникает ряд проблем:

- отстройка от нагрузочных (транзитных) токов линий;
- выбор характеристик срабатывания реле сопротивления;
- согласование с линейными защитами и с защитами, установленными на отпайках;
- диапазон изменения токов в режиме аварии на линии превышает диапазон изменения токов при замыканиях в трансформаторах ответственных подстанций;
- необходимость учитывать наличие тяговой нагрузки на некоторых линиях.

С целью выявления достоинств нового предлагаемого метода можно рассмотреть поведение классического дистанционного органа на примере имитационной модели, показанной на рис. 1. Примем, что отпаечный трансформатор не нагружен. Будем модели-

The sensitivity of distance protection of power lines and a selective tripping of hard recognizable short circuits in power transformers or on the side of low voltage of branch substations are shown.

Key words: distance protection, long-range backup protection, tapping substation, power transformer.

ровать трёхфазные замыкания на стороне низшего напряжения подстанции.

В симметричном нагрузочном режиме (рис. 1, а) входное сопротивление $Z_{с.н.п}$ на зажимах дистанционного органа в месте наблюдения определяется соотношением:

$$Z_{с.н.п} = \frac{U_{с.н.п}}{I_{с.н.п}} = \frac{E_s (Z_1 + Z_2 + Z_r) + Z_s E_r}{E_s - E_r} = \frac{(Z_1 + Z_2 + Z_r) + Z_s E_r / E_s}{1 - E_r / E_s}. \quad (1)$$

При трёхфазном замыкании с переходным сопротивлением $R_f = 0$ Ом на стороне низшего напряжения трансформатора (рис. 2, а) ток

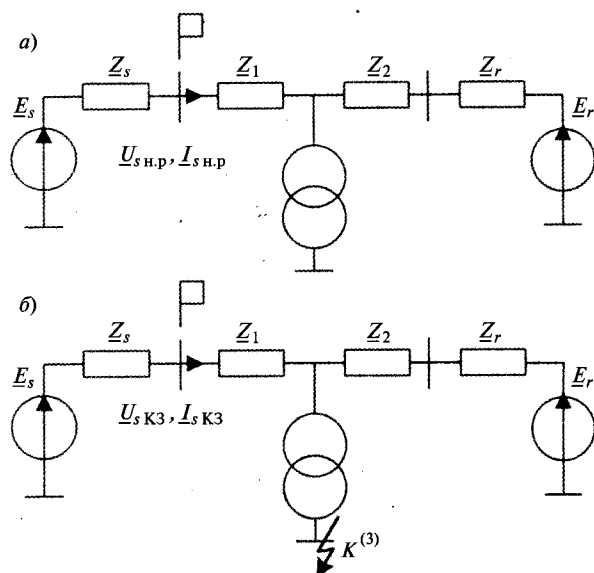


Рис. 1. Имитационная модель ЛЭП с ответственной подстанцией: а – нагрузочный режим работы; б – замыкание на стороне низшего напряжения подстанции

I_{sK3} , напряжение U_{sK3} и входное сопротивление Z_{sK3} на зажимах дистанционного органа в месте наблюдения определяются соотношениями:

$$I_{sK3} = \frac{E_s - E_r Z_T / (Z_T + Z_2 + Z_r)}{Z_s + Z_1 + Z_T (Z_2 + Z_r) / (Z_T + Z_2 + Z_r)};$$

$$U_{sK3} = \frac{E_s (Z_1 + Z_T (Z_2 + Z_r) / (Z_T + Z_2 + Z_r)) + E_r Z_s Z_T / (Z_T + Z_2 + Z_r)}{Z_s + Z_1 + Z_T (Z_2 + Z_r) / (Z_T + Z_2 + Z_r)};$$

$$Z_{sK3} = \frac{U_{sK3}}{I_{sK3}} = \frac{E_s (Z_1 + Z_T (Z_2 + Z_r) / (Z_T + Z_2 + Z_r)) + E_r Z_s Z_T / (Z_T + Z_2 + Z_r)}{E_s - E_r Z_T / (Z_T + Z_2 + Z_r)}; \quad (2)$$

Найдём области, в которых располагается сопротивление на зажимах дистанционного органа с учётом ограничений, определяемых условием, что соотношение ЭДС по модулю не выходит за пределы $k_1 \leq \text{mod}(E_r / E_s) \leq k_2$, где $k_1 = \text{mod}(E_{r \min} / E_{s \max})$ и $k_2 = \text{mod}(E_{r \max} / E_{s \min})$. Другое ограничение определяется из условия устойчивости энергетической системы: $-90^\circ < \arg(E_r / E_s) < 90^\circ$.

Для нагрузочного режима из выражения (1) получим соотношения:

$$\frac{E_{r \min}}{E_{s \max}} < \text{mod} \left(\frac{Z_{s \text{ н.п}} - a_{\text{н.п}}}{Z_{s \text{ н.п}} - b_{\text{н.п}}} \right) < \frac{E_{r \max}}{E_{s \min}};$$

$$\alpha_1 < \arg \left(\frac{Z_{s \text{ н.п}} - a_{\text{н.п}}}{Z_{s \text{ н.п}} - b_{\text{н.п}}} \right) < \alpha_2,$$

где $a_{\text{н.п}} = Z_1 + Z_2 + Z_r$; $b_{\text{н.п}} = -Z_s$.

Для режима с замыканием из выражения (2) получим соотношения:

$$\text{mod} \left(Z_T / (Z_T + Z_2 + Z_r) \right) \frac{E_{r \min}}{E_{s \max}} <$$

$$< \text{mod} \left(\frac{Z_{sK3} - a_{K3}}{Z_{sK3} - b_{K3}} \right) <$$

$$< \frac{E_{r \max}}{E_{s \min}} \text{mod} \left(Z_T / (Z_T + Z_2 + Z_r) \right);$$

$$\alpha_1 + \arg(Z_T / (Z_T + Z_2 + Z_r)) < \arg \left(\frac{Z_{sK3} - a_{K3}}{Z_{sK3} - b_{K3}} \right) <$$

$$< \alpha_2 + \arg(Z_T / (Z_T + Z_2 + Z_r)),$$

где $a_{K3} = (Z_1 + Z_T (Z_2 + Z_r) / (Z_T + Z_2 + Z_r))$; $b_{K3} = -Z_s$.

На рис. 2 построены области замера сопротивления для имитационной модели с параметрами $Z_1 = Z_2 = 9,96 + j17,08$ Ом, $Z_s = Z_r = 15,63 + j31,25$ Ом, $0,9 \leq \text{mod}(E_r / E_s) \leq 1,1$ и $-60^\circ < \arg(E_r / E_s) < 60^\circ$.

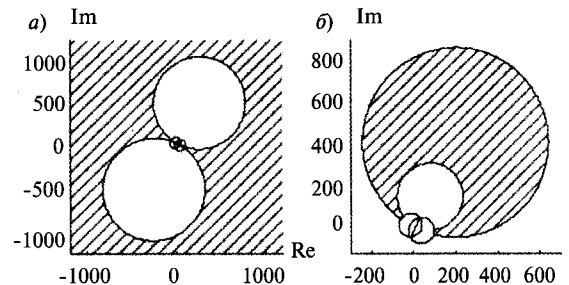


Рис. 2. Области расположения входного сопротивления дистанционного органа: а – нагрузочный режим; б – замыкание за трансформатором ($S_{\text{ном}} = 6,3$ МВ·А, $Z_T = 14,7 + j220,4$ Ом)

На практике необходимо учитывать изменения загрузки трансформаторов, сопротивлений эквивалентных ЭДС, поэтому осуществить полноценное дальней резервирование при замыканиях на стороне низшего напряжения ответвительных подстанций на линии с двухсторонним питанием, используя классический дистанционный орган, затруднительно.

В защите проблема выявления повреждения отпаечного трансформатора решена путём расширения информационной базы защиты. С помощью нового метода, названного информационным анализом [1], разработана защита дальнего резервирования Бреслер-0107.030, оперирующая всей доступной информацией при наблюдении за линией электропередачи с одного конца: током и напряжением предшествующего и аварийного режимов [2–5]. Данная защита решает проблему выявления факта повреждения отпаечного трансформатора.

В основу защиты положен адаптивный дистанционный принцип, оперирующий с алгоритмической моделью объекта (АМО). Алгоритмическая модель объекта позволяет оценить токи и напряжения в произвольной точке защищаемой схемы. Зная значения аварийных и предшествующих токов и на-

пряжений в месте установки защиты, она по определённым законам оценивает токи и напряжения в месте установки виртуального реле сопротивления (ВРС), в данном случае в ветви предполагаемого повреждения за трансформатором на ответвительной подстанции (рис. 3). С помощью алгоритмических моделей удаётся настроить виртуальные реле на каждую защищаемую ответвительную подстанцию, если их несколько. Это позволяет упростить расчёт уставочных характеристик и добавляет возможность идентифицировать повреждённую отпайку. Данный способ эффективен, поскольку решает проблему объединения информации о защищаемом объекте.

Алгоритмическую модель объекта разделяют на модель предшествующего и чисто аварийного режимов. Модель предшествующего режима формирует замер напряжений $\underline{U}_{f\text{пд}}$ в ветви предполагаемого повреждения, по замерам напряжения $\underline{U}_{s\text{пд}}$ и тока $\underline{I}_{s\text{пд}}$ из места наблюдения. АМО в предрежиме представлена формулой:

$$\underline{U}_{f\text{пд}} = K_{1\text{пд}} \underline{U}_{s\text{пд}} + K_{2\text{пд}} \underline{I}_{s\text{пд}}, \quad (3)$$

где $\underline{U}_{s\text{пд}}$ – фазное напряжение в предрежиме в месте установки защиты, В; $\underline{I}_{s\text{пд}}$ – ток в предрежиме в месте установки защиты, А; $K_{1\text{пд}}$, $K_{2\text{пд}}$ – передаточные коэффициенты предрежима АМО; $\underline{U}_{f\text{пд}}$ – фазное напряжение предрежима в ветви повреждения, В.

В предшествующем режиме в ветви предполагаемого повреждения отсутствовали токи, поэтому $\underline{I}_{f\text{пд}} = 0$.

Модель чисто аварийного режима формирует замер напряжений $\underline{U}_{f\text{ав}}$ и токов $\underline{I}_{f\text{ав}}$ в ветви предполагаемого повреждения по замерам чисто аварийных составляющих напряжения $\underline{U}_{s\text{ав}}$ и тока $\underline{I}_{s\text{ав}}$ из места установки защиты. Модель чисто аварийного режима представлена формулой:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{f\text{ав}} &= K_{1\text{ав}} \underline{U}_{s\text{ав}} + K_{2\text{ав}} \underline{I}_{s\text{ав}}; \\ \underline{I}_{f\text{ав}} &= K_{3\text{ав}} \underline{U}_{s\text{ав}} + K_{4\text{ав}} \underline{I}_{s\text{ав}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\underline{U}_{s\text{ав}}$ – фазное напряжение чисто аварийного режима в месте установки защиты, В; $\underline{I}_{s\text{ав}}$ – ток чисто аварийного режима в месте установки защиты, А; $K_{1\text{ав}}$, $K_{2\text{ав}}$, $K_{3\text{ав}}$, $K_{4\text{ав}}$ – передаточные коэффициенты чисто аварийного режима АМО; $\underline{U}_{f\text{ав}}$ – напряжение чисто аварийного режима в ветви предполагаемого повреждения, В; $\underline{I}_{f\text{ав}}$ – ток в ветви предполагаемого повреждения чисто аварийного режима, А.

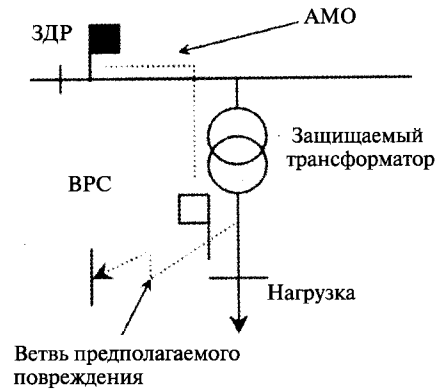


Рис.3. Алгоритмическая модель объекта

Составляющие чисто аварийного режима в месте наблюдения определяются как комплексная разность: $\underline{U}_{s\text{ав}} = \underline{U}_{s\text{тк}} - \underline{U}_{s\text{пд}}$, $\underline{I}_{s\text{ав}} = \underline{I}_{s\text{тк}} - \underline{I}_{s\text{пд}}$. Передаточные коэффициенты АМО зависят только от пассивных параметров схемы замещения предшествующего и чисто аварийного режимов.

Учитывая, что $\underline{I}_{f\text{тк}} = \underline{I}_{f\text{ав}}$, $\underline{U}_{f\text{тк}} = \underline{U}_{f\text{ав}} + \underline{U}_{f\text{пд}}$, получаем текущие значения токов и напряжений в ветви предполагаемого повреждения по составляющим предшествующего и чисто аварийного режимов. Алгоритмическая модель объекта описана формулой:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{f\text{тк}} &= K_{1\text{пд}} \underline{U}_{s\text{пд}} + K_{2\text{пд}} \underline{I}_{s\text{пд}} + \\ &+ K_{1\text{ав}} \underline{U}_{s\text{ав}} + K_{2\text{ав}} \underline{I}_{s\text{ав}}; \\ \underline{I}_{f\text{тк}} &= K_{3\text{ав}} \underline{U}_{s\text{ав}} + K_{4\text{ав}} \underline{I}_{s\text{ав}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\underline{U}_{f\text{тк}}$ – текущее значение фазного напряжения в ветви повреждения, В; $\underline{I}_{f\text{тк}}$ – текущее значение тока в ветви предполагаемого повреждения, А.

Кроме алгоритмической модели объекта в виртуальное реле сопротивления входит формирователь замера сопротивления, который объединяет информацию о токах и напряжениях различных режимов (предшествующего и чисто аварийного) в единый алгоритмический параметр – замер текущего сопротивления в месте предполагаемого повреждения. Специфика отпаечного трансформатора такова, что возможны только два вида повреждения на нижней стороне трансформатора. В защите реализовано четыре формирователя замера текущего сопротивления: три для междофазных и один для трёхфазного замыканий:

$$\underline{Z}_{f\text{тк}} = \frac{\underline{U}_{f\text{тк}}}{\underline{I}_{f\text{тк}}}; \quad \underline{Z}_{fbc\text{тк}} = \frac{\underline{U}_{fb\text{тк}} - \underline{U}_{fc\text{тк}}}{\underline{I}_{fb\text{тк}} - \underline{I}_{fc\text{тк}}};$$

$$\underline{Z}_{f_{сатк}} = \frac{U_{f_{стк}} - U_{f_{атк}}}{I_{f_{стк}} - I_{f_{атк}}}; \quad \underline{Z}_{f_{абтк}} = \frac{U_{f_{атк}} - U_{f_{бтк}}}{I_{f_{атк}} - I_{f_{бтк}}}$$

Таким образом, в защите заложен дистанционный принцип выявления факта повреждения защищаемого трансформатора. Защита оперирует оцениваемыми алгоритмической моделью величинами. Для каждой из защищаемых отпаек применяется своя АМО и уставочная характеристика, при трёхфазных и междуфазных замыканиях, полигональной формы, позволяющая гибко отстроиться от рабочих коммутаций.

Рис. 4 иллюстрирует принцип работы виртуального реле сопротивления при трёхфазном замыкании на стороне низшего напряжения трансформатора. Как известно, расчёт токов и напряжений в режиме замыкания можно заменить расчётом предшествующего и чисто аварийного режимов. В модели чисто аварийного режима в ветви повреждения находится источник ЭДС, равный напряжению в точке замыкания в предшествующем режиме.

Замер виртуального реле сопротивления при трёхфазном замыкании равен:

$$\underline{Z}_{f_{тк}} = \frac{U_{f_{тк}}}{I_{f_{тк}}} = \frac{U_{f_{пд}} + U_{f_{ав}}}{I_{f_{ав}}} = \frac{U_{f_{пд}}}{I_{f_{ав}}} + \frac{U_{f_{ав}}}{I_{f_{ав}}},$$

где $\frac{U_{f_{ав}}}{I_{f_{ав}}} = -\underline{Z}_{эқв}$ — эквивалентное сопротивление

ление за спиной виртуального реле сопротивления.

Из схемы замещения чисто аварийного режима (рис. 4,з) вытекает следующее равенство: $\frac{U_{f_{пд}}}{I_{f_{ав}}} = R_f + \underline{Z}_{эқв}$.

Таким образом, $\underline{Z}_{f_{тк}} = \frac{U_{f_{тк}}}{I_{f_{тк}}} = R_f + \underline{Z}_{эқв} -$

$-\underline{Z}_{эқв} = R_f$. Видно, что замер виртуального реле сопротивления не зависит от значений эквивалентных ЭДС систем и угла передачи между ними. Замер ВРС отстроен от нагрузочных режимов и зависит от переходного сопротивления в месте замыкания и адекватности реальной сети к алгоритмической модели. Альтернативными режимами для адаптивной защиты, реагирующей на изменения режима, являются рабочие коммутации и замыкания в смежных элементах.

На практике модель адекватна объекту не в полной мере, что в свою очередь приводит к смещению замера и соответственно к расширению области наблюдаемых режимов, как показано на рис. 5. Это может быть вызвано изменением нагрузки трансформатора, оперативными переключениями на смежных объектах или изменениями параметров самого трансформатора (например, при изменении положения РПН). В данном алгоритме используется линейная аппроксимация сложной области наблюдаемых режимов четырёхугольником в целях упрощения опера-

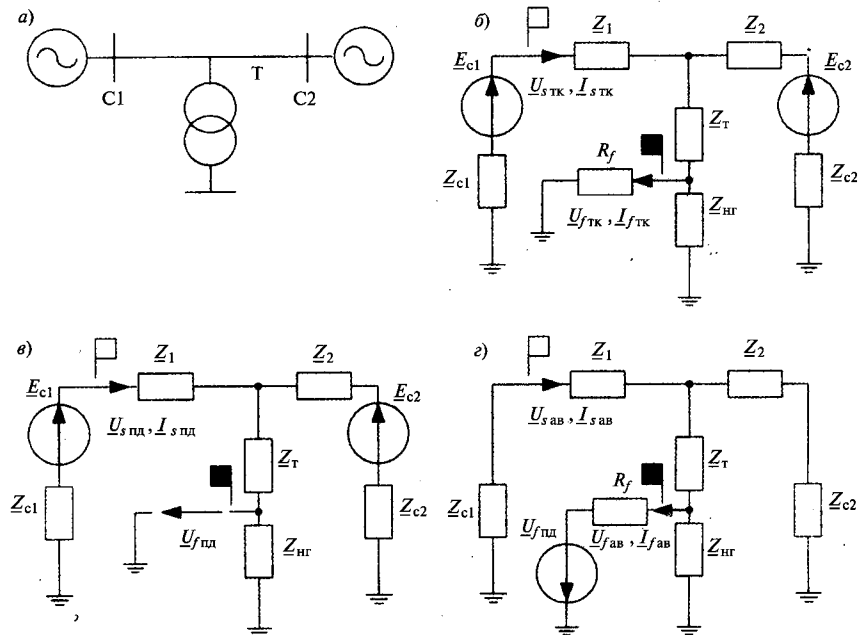


Рис. 4. Алгоритм работы виртуального реле сопротивления: а — схема сети; б — схема замещения сети в режиме замыкания; в — схема замещения предаварийного режима; г — схема замещения чисто аварийного режима

ции определения попадания замера АРС в область, ограниченную уставочной характеристикой (уставочная область).

Для каждого из состояний защищаемого объекта строится уставочная характеристика по опытам КЗ.

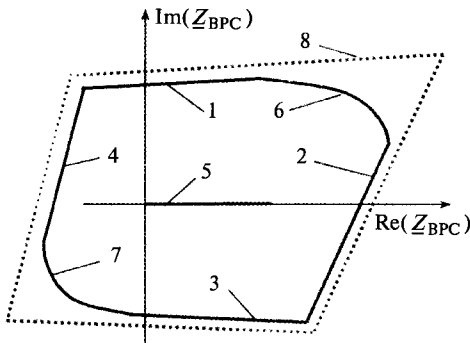


Рис. 5. Область отслеживаемых режимов при различных неадекватностях АМО

Первый опыт – годограф 1. Строится при варьировании переходного сопротивления R_f . Полные сопротивления объекта зафиксированы: $Z_{c1} = \max$, $Z_{c2} = \min$, нагрузка отпаечных трансформаторов максимальна.

Второй опыт – годограф 2. Строится при варьировании сопротивления системы справа Z_{c2} . Параметры объекта – $R_f = \max$, $Z_{c1} = \max$, отпаечные трансформаторы на холостом ходу.

Третий опыт – годограф 3. Строится при варьировании переходного сопротивления R_f . Параметры объекта: $Z_{c1} = \max$, $Z_{c2} = \max$, отпаечные трансформаторы на холостом ходу.

Четвёртый опыт – годограф 4. Строится при варьировании сопротивления системы справа Z_{c2} . Параметры объекта: $R_f = 0$, $Z_{c1} = \max$, нагрузка отпаечных трансформаторов максимальна.

Годограф 5 строится при варьировании переходного сопротивления R_f и при полном соответствии алгоритмической модели имитационной.

Годографы 6 и 7 строятся при варьировании коэффициентов нагрузки отпаечных трансформаторов. Годограф 6 – $R_f = \max$, $Z_{c1} = \max$, $Z_{c2} = \min$. Годограф 7 – $R_f = 0$, $Z_{c1} = \max$, $Z_{c2} = \max$.

Результирующей является характеристика 8, отстроенная от альтернативных режимов и охватывающая все промежуточные годографы согласно рис. 5.

Пусковой орган защиты дальнего резервирования оперирует аварийными составляющими, возникающими при изменении режи-

ма работы сети. Реагирует на векторное приращение контролируемой величины: тока прямой последовательности (трёхфазные замыкания) и тока обратной последовательности (междуфазные замыкания). Условие срабатывания пускового органа записывается как $I_{устs} < \text{mod}(I_{s\text{тк}} - I_{s\text{пд}})$, $s=1,2$.

К пусковым органам защиты предъявлены следующие требования:

- пускать защиту при замыканиях в зоне и блокировать защиту при замыканиях за спиной;

- блокировать защиту при отключении замыкания основной защитой линии или ответвления.

Для этих целей в защите дополнительно используются измерительные органы, реагирующие на мощность аварийных составляющих

$\underline{S}_{ав} = \underline{U}_{ав} \cdot \underline{I}_{ав}^*$ и на аварийную составляющую мощности $\Delta \underline{S}_{sав} = \underline{S}_{s\text{тк}} - \underline{S}_{s\text{пд}}$. В этих органах в качестве контролируемых величин были взяты составляющие прямой последовательности, поскольку они изменяются при любых видах повреждений и коммутаций в энергосистеме.

В схеме чисто аварийного режима в месте коммутации находится источник тока или источник ЭДС. Напряжение чисто аварийного режима прямой последовательности в месте установки защиты при коммутации за спиной: $\underline{U}_{ав} = \underline{I}_{ав} Z_{п1}$, при коммутации в зоне $\underline{U}_{ав} = \underline{I}_{ав} Z_{п2}$, где $Z_{п1}$ – эквивалентное сопротивление участка цепи перед нами, $Z_{п2}$ – за спиной.

Мощность аварийных составляющих в месте установки защиты при коммутации за спиной примет вид $\underline{S}_{ав} = (I_{ав})^2 Z_{п1}$, при коммутации в зоне: $\underline{S}_{ав} = -(I_{ав})^2 Z_{п2}$.

Поскольку эквивалентные сопротивления имеют активно-индуктивный характер, то критерием коммутации за спиной является одно из следующих неравенств $\text{Re} \underline{S}_{ав} > 0$, $\text{Im} \underline{S}_{ав} > 0$, а коммутации в зоне: $\text{Re} \underline{S}_{ав} < 0$, $\text{Im} \underline{S}_{ав} < 0$. Для мощности аварийных составляющих прямой последовательности данные критерии справедливы для всех видов повреждений.

Защите дальнего резервирования необходимо отслеживать изменения режимов работы защищаемой электропередачи и чётко различать:

- переход с нормального режима работы к аварийному режиму;

– переход с аварийного режима работы к нормальному режиму.

Для этой цели предлагается использовать измерительный орган, реагирующий на аварийную составляющую мощности прямой последовательности в месте наблюдения $\Delta \underline{S}_{s\text{ ав}}$. На примере простейшей имитационной модели (рис. 6) рассмотрим применение данного органа.

Анализ имитационной модели нормально-го режима даёт следующее выражение напряжения в месте повреждения $\underline{U}_{\text{н.р}} = E(1+e^{j\varphi})/2$. Ток чисто аварийного режима в месте наблюдения

$$\underline{I}_{s\text{ ав1}} = \frac{E(1+e^{j\varphi})}{4R_f + jX^0l} \text{ – при переходе с нор-}$$

мального режима работы к аварийному;

$$\underline{I}_{s\text{ ав2}} = -\frac{E(1+e^{j\varphi})}{4R_f + jX^0l} \text{ – при переходе с ава-}$$

рийного режима работы к нормальному.

При изменении нормального режима на аварийный

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_{s\text{ ав1}} &= \underline{U}_{s\text{ тк}}^* \underline{I}_{s\text{ тк}}^* - \underline{U}_{s\text{ пд}}^* \underline{I}_{s\text{ пд}}^* = \\ &= E \underline{I}_{s\text{ КЗ}}^* - E \underline{I}_{s\text{ н.р}}^* = E \underline{I}_{s\text{ ав1}}^* = \frac{E^2(1+e^{-j\varphi})}{4R_f - jX^0l}. \end{aligned}$$

При изменении аварийного режима на нормальный

$$\begin{aligned} \Delta \underline{S}_{s\text{ ав2}} &= \underline{U}_{s\text{ тк}}^* \underline{I}_{s\text{ тк}}^* - \underline{U}_{s\text{ пд}}^* \underline{I}_{s\text{ пд}}^* = \\ &= E \underline{I}_{s\text{ н.р}}^* - E \underline{I}_{s\text{ КЗ}}^* = E \underline{I}_{s\text{ ав2}}^* = -\frac{E^2(1+e^{-j\varphi})}{4R_f - jX^0l}. \end{aligned}$$

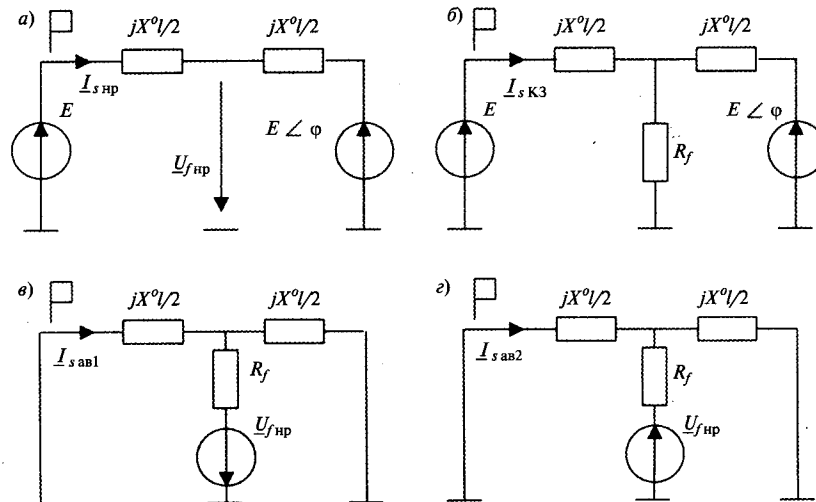


Рис.6. Простейшая имитационная модель линии электропередачи: а – нормальный режим работы; б – режим КЗ; в – чисто аварийный режим при переходе от нормального режима к замыканию; г – чисто аварийный режим при переходе от замыкания к нормальному режиму

Годографы областей $\Delta \underline{S}_{s\text{ ав1}}$ и $\Delta \underline{S}_{s\text{ ав2}}$ не имеют общих точек. Данное утверждение справедливо и при замыканиях в отпаечных трансформаторах.

Критерием возникновения замыкания служит неравенство $\text{Re}(\Delta \underline{S}_{s\text{ ав}} e^{-j60^\circ}) > 0$, показывающее, что при возникновении замыкания происходит скачкообразное увеличение реактивной мощности, протекающей в месте установки защиты, а при отключении замыкания – скачкообразное уменьшение.

Защита решает проблему дальнего резервирования во всех случаях, в том числе и там, где невозможно дальнейшее резервирование традиционным способом или, где нет вовсе дистанционной защиты, а токовая защита не обладает достаточной чувствительностью. К настоящему моменту проведены испытания на объектах обоих типов. Рассмотрим результаты испытаний на объекте первого типа линии «Орша–Бобр» (Витебскэнерго, Белоруссия) с пятью отпайками.

Устройство защиты дальнего резервирования в декабре 1998 г. было введено в опытную эксплуатацию в «Витебскэнерго» на подстанции Орша-330, транзитная ЛЭП-110 кВ «Орша–Бобр» с пятью отпайками. Дальнее резервирование усложнено тяговой нагрузкой (до 40% по току обратной последовательности). К тому же максимальные токи транзита превышают токи КЗ за трансформаторами отпаек.

В 1998 и 2000 гг. были проведены натурные испытания адаптивной защиты при КЗ на фидерах, отходящих от отпаечных трансформаторов малой мощности (2,5 МВА –

подстанции «Лисуны» и «Славное»), как в режиме транзита, так и в тупиковом (разрыв транзита на подстанции «Бобр»). Результаты подтвердили высокую чувствительность и правильную работу разработанной защиты.

Ко второму типу относится линия «Саянская – Агинская», Красноярскэнерго. Данная линия до установки микропроцессорного терминала была оборудована только токовой защитой, чувствительности которой не хватало для целей дальнего резервирования. Изначально защита настраивалась на распознавание замыканий в трансформаторе подстанции «Унер», а опытное междуфазное КЗ было решено провести в 10 км от подстанции на отходящем фидере. Даже при столь значительном расширении зоны дальнего резервирования защита сработала правильно, продемонстрировав высокую чувствительность. Терминал устанавливался с одной стороны.

В 2003 г. испытания проводились на линии Полоцк – Глубокое при двухстороннем замере. Токи КЗ за трансформатором чаще всего не превышают нормальные токи нагрузочных режимов, что является основной трудностью для осуществления дальнего резервирования. Особенности последнего объекта являются переток активной мощности от сильного источника к слабому и наличие обходной связи, что вызывает дополнительные трудности для защиты, установленной на слабом конце. Опыты междуфазных КЗ проходили на подстанции «Прозороки» на шинах низшего напряжения. Со стороны подстанции «Полоцк» защита сработала, со стороны подстанции «Глубокое» потребовалось дополнительное обучение. В ходе опытов междуфазных замыканий выяснилась интересная особенность: при замыкании фаз *B* и *C* за отпаечным трансформатором на сильной стороне повреждение можно интерпретировать как междуфазное замыкание фаз *A* и *B*, а на слабой стороне ток возрос только в фазе *C*, в фазе *A* уменьшился, а фазе *B* не изменился. При последующем имитационном моделировании опытных замыканий, эти эффекты также проявились. Это объясняется влиянием группы соединения обмоток трансформатора и наличием обходной связи. Трёхфазное КЗ ставилось на подстанции «Караси», при этом оба терминала сработали.

Выводы

1. В практических опытах в реальных условиях доказана высокая чувствительность и

селективность дальнего резервирования на основе виртуальных реле сопротивления.

2. Проведены натурные испытания в различных режимах линии электропередачи: транзита и тупика. Отмечена корректная работа при появлении альтернативной ситуации – разрыва транзита.

3. Разработана методика выбора уставок и пусковых органов защиты, обеспечивающих высокую степень чувствительности и селективности при согласовании с другими защитами.

4. Разработанная методика реализована НПП «Бреслер» в терминалах Бреслер-0107.030. В настоящее время в различных энергосистемах установлены и работают более 60 устройств высокочувствительной защиты дальнего резервирования. Наиболее крупная поставка состоялась в 2008–2009 гг. в Камчатскэнерго, где введены в работу 29 терминалов защиты дальнего резервирования, установленных в 11 шкафах, что подтверждает высокую востребованность защит данного типа.

Список литературы

1. Y. Liamets, S. Ivanov. Informational analysis – new relay protection tool // Proc. 13th Int. Conf. Power System Protection, Bled. 2002. P.197–210.
2. Павлов А.О., Васильев Д.С. Высокочувствительная защита дальнего резервирования линий электропередачи // Энергетик. 2008. №12. С.5–7.
3. Еремеев Д.Г. Разработка и исследование микропроцессорной защиты дальнего резервирования. Дис. ...канд. техн. наук. Чебоксары, Чуваш. ун-т, 2010.
4. Павлов А.О. Информационные аспекты распознавания коротких замыканий в линиях электропередачи в приложении к защите дальнего резервирования Дис. ...канд. техн. наук. Чебоксары, Чуваш. ун-т, 2002.
5. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007.

Васильев Дмитрий Сергеевич – заведующий сектором ЗДР ООО «НПП Бреслер», аспирант кафедры «ТОЭ и РЗА» электроэнергетического факультета Чувашского ГУ.

Еремеев Дмитрий Григорьевич – и.о. руководителя департамента технического маркетинга ОАО «ВНИИР», канд. техн. наук. Окончил кафедру «ТОЭ и РЗА» электроэнергетического факультета Чувашского ГУ в 2002 г. Защитил диссертацию по теме «Разработка и исследование микропроцессорной защиты дальнего резервирования» в 2010 г.

Павлов Александр Олегович – руководитель отдела РЗА ООО «НПП Бреслер». Окончил кафедру «ТОЭ и РЗА» электроэнергетического факультета Чувашского ГУ в 1998 г. Защитил диссертацию по теме «Информационные аспекты теории распознавания коротких замыканий в линиях электропередачи в приложении к защите дальнего резервирования» в 2002 г.

Новые реле максимального тока РСТ80 и их времятоковые характеристики

ЕРОХИН Е.Ю.

Рассмотрены проблемы эксплуатации электромеханических реле максимального тока и построения систем релейной защиты с использованием их времятоковых характеристик. Приведены отличительные особенности новых статических реле максимального тока РСТ80. Показано, что 4 типа времятоковых характеристик, реализованных в реле РСТ80, обеспечивают гибкое согласование с характеристиками защит смежного оборудования.

Ключевые слова: реле максимального тока, времятоковая характеристика.

Реле максимального тока с зависимой от тока выдержкой времени широко используются на объектах энергетики в релейной защите электрических машин, трансформаторов, линий электропередачи для защиты от перегрузок и КЗ. В основном это электромеханические реле серий РТ-80 и РТ-90, которых выпущено более 1млн. штук [1]. В последние несколько лет на рынке появились статические микроэлектронные и микропроцессорные реле серий РС80М, РС80М2(М), РСТ-80АВ, РЗЛ-03 с аналогичными функциями, однако их число относительно невелико.

При эксплуатации указанных электромеханических реле потребители сталкиваются с рядом проблем:

1) нижний предел диапазона рабочих температур -20°C , что гораздо меньше, чем у большинства других реле (-40°C), однако даже при небольших отрицательных температурах у реле может отказать механизм отсчёта выдержки времени — перестаёт вращаться диск из-за замерзания попавшей под кожу влаги;

2) максимальный ток шунтирования/дешунтирования 150 А, что по опыту эксплуатации недостаточно, поскольку при КЗ токи вторичных обмоток измерительных трансформаторов могут быть больше;

3) необходимость проведения регулярных регламентных работ, связанных с разборкой реле и регулированием его механизмов.

При построении систем РЗА проявляется ещё один существенный недостаток электро-

Problems of running electromechanic overcurrent relays and designing relay protection systems using time-current characteristics of these relays are considered. Distinctive features of the newest static overcurrent relays RST80 are given. It is shown, that 4 types of time-current characteristics implemented in relays RST80 provide flexible co-ordination with characteristics of protection of related equipment.

Key words: overcurrent relay, time-current characteristic.

механических реле: зависимые от тока характеристики — только одного типа, поэтому они в принципе не могут одинаково хорошо согласовываться с соответствующими характеристиками и плавких предохранителей, и электродвигателей, и автоматических выключателей, и других устройств защиты нижестоящего уровня. На рис. 1 показано, что характеристики реле РТ-80 плохо согласуются с характеристиками асинхронного двигателя и автоматического выключателя в области малых перегрузок.

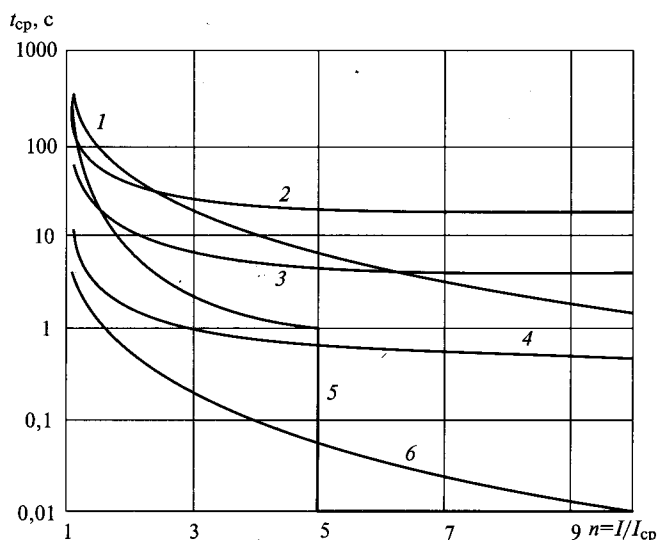


Рис. 1. Сопоставление характеристик реле РТ-80 и смежного оборудования: 1 — характеристика перегрузки асинхронного двигателя (одноэкспонентная тепловая модель); 2 — характеристика реле РТ-80 ($t_{10}=16$ с); 3 — характеристика реле РТ-80 ($t_{10}=4$ с); 4 — характеристика реле РТ-80 ($t_{10}=0,5$ с); 5 — характеристика автоматического выключателя; 6 — характеристика предохранителя ПКТ

Поскольку рассматриваемый класс реле максимального тока ещё длительное время будет использоваться в схемах защиты распределительных сетей, то актуальна задача создания такого реле, которое лишено отмеченных недостатков электромеханических аналогов и имеет набор времятоковых характеристик, необходимый и достаточный для гибкого согласования с характеристиками защит смежного оборудования.

Такая задача была решена в ОАО «ВНИИР» при разработке реле серии РСТ80 (рис. 2). Новые реле – статические по принципу действия – выполнены с применением микроконтроллера, способны заменить реле РТ-80, РС80М, РСТ-80АВ.

Среди отличительных особенностей новых реле – отсутствие необходимости в специальных регламентных работах по разборке и регулированию механизмов реле, диапазон рабочих температур от -40 до $+55$ °С, шунтирование/дешунтирование контактами выходного электромагнитного реле токов до 200А, соответствие требованиям электромагнитной совместимости по ГОСТР51317.6.5-2006 [2], возможность крепления на DIN-рейку 35 мм. Другие параметры реле РСТ80 приведены в таблице.

В контексте рассматриваемой проблемы наибольший интерес представляет возможность выбора из 4 типов времятоковых характеристик срабатывания. Это должно обеспе-

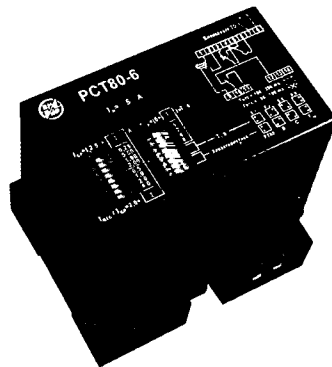


Рис. 2. Реле серии РСТ80

чить гибкость при согласовании с характеристиками защитных устройств и защищаемых объектов (плавкие предохранители в цепях первичных обмоток понижающих трансформаторов напряжения, реле защиты нижестоящего уровня, электродвигатели).

Зависимые от тока характеристики описываются следующими аналитическими выражениями:

– характеристика типа РТ-80

$$t_{\text{РТ-80}} \left(\frac{I}{I_{\text{ср}}} \right) = \frac{K}{\frac{I}{I_{\text{ср}}} - 1} + T; \quad (1)$$

– характеристика типа В;

$$t_B \left(\frac{I}{I_{\text{ср}}} \right) = \frac{9t_{10}}{\frac{I}{I_{\text{ср}}} - 1}; \quad (2)$$

Параметры реле РСТ80

Параметр	РСТ80-1	РСТ80-3	РСТ80-5	РСТ80-6
Количество, вид и функция контактов (ТО – токовая отсечка, МТЗ – максимальная токовая защита)	1 переключение и 1 замыкание, главные (ТО+МТЗ)	1 переключение и 1 замыкание, главные (ТО), 1 переключение, сигнальный (МТЗ)	1 переключение, перекрывающий, 1 переключение, главный (ТО+МТЗ)	1 переключение, перекрывающий, 1 переключение, главный (ТО), 1 переключение, сигнальный (МТЗ)
Номинальный ток I_N , А	5; 10			
Уставки тока срабатывания $I_{\text{ср}}$, А	$(0,25 - 1,00) \times I_N$ с шагом $0,05 \times I_N$			
Уставки кратности срабатывания ТО $I_{\text{отс}}/I_{\text{ср}}$	2,0 – 9,5 с шагом 0,5			
Уставки времени срабатывания t_{10} (при $I/I_{\text{ср}}=10$), с	0,5 – 2,0 с шагом 0,1; 1,0 – 4,0 с шагом 0,2; 2,0 – 8,0 с шагом 0,4; 4,0 – 16,0 с шагом 0,8			
Уставки времени срабатывания ТО, мс	80 – 100 180 – 200			
Коэффициент возврата	0,90 – 0,95			
Времятоковые характеристики срабатывания	типа РТ-80; типов В и С по ГОСТ 3698-82 [3]; независимая			

– характеристика типа С

$$t_C \left(\frac{I}{I_{cp}} \right) = \frac{99t_{10}}{\left(\frac{I}{I_{cp}} \right)^2 - 1}, \quad (3)$$

где t_{10} – время срабатывания при 10-кратном токе срабатывания.

Параметры K и T характеристики реле РТ-80 вычисляются по эмпирическим формулам, полученным в результате анализа семейства характеристик реле РТ-80:

– для диапазонов $t_{10} = 0,5 \div 2,0$ и $1,0 \div 4,0$ с:

$$K = \frac{27}{28}t_{10} + \frac{4500}{7}; \quad T = \frac{25}{28}t_{10} - \frac{500}{7};$$

– для диапазонов $t_{10} = 2,0 \div 8,0$ и $4,0 \div 16,0$ с:

$$K = \frac{27}{28}t_{10} + \frac{18000}{7}; \quad T = \frac{25}{28}t_{10} - \frac{2000}{7}.$$

Графики характеристик срабатывания реле РСТ80 приведены на рис. 3.

В реальных условиях эксплуатации ток I меняется от одного цикла измерений к другому, поэтому в программе микроконтроллера реле РСТ80 подсчёт времени срабатывания происходит не напрямую по формулам (1)–(3), а по соответствующим интегральным выражениям, пока накопленная сумма не превысит 1:

– характеристика типа РТ-80

$$\sum \frac{\Delta t \left(\frac{I(t)}{I_{cp}} - 1 \right)}{K + T \left(\frac{I(t)}{I_{cp}} - 1 \right)} \geq 1; \quad (4)$$

– характеристика типа В

$$\sum \frac{\Delta t \left(\frac{I(t)}{I_{cp}} - 1 \right)}{9t_{10}} \geq 1; \quad (5)$$

– характеристика типа С

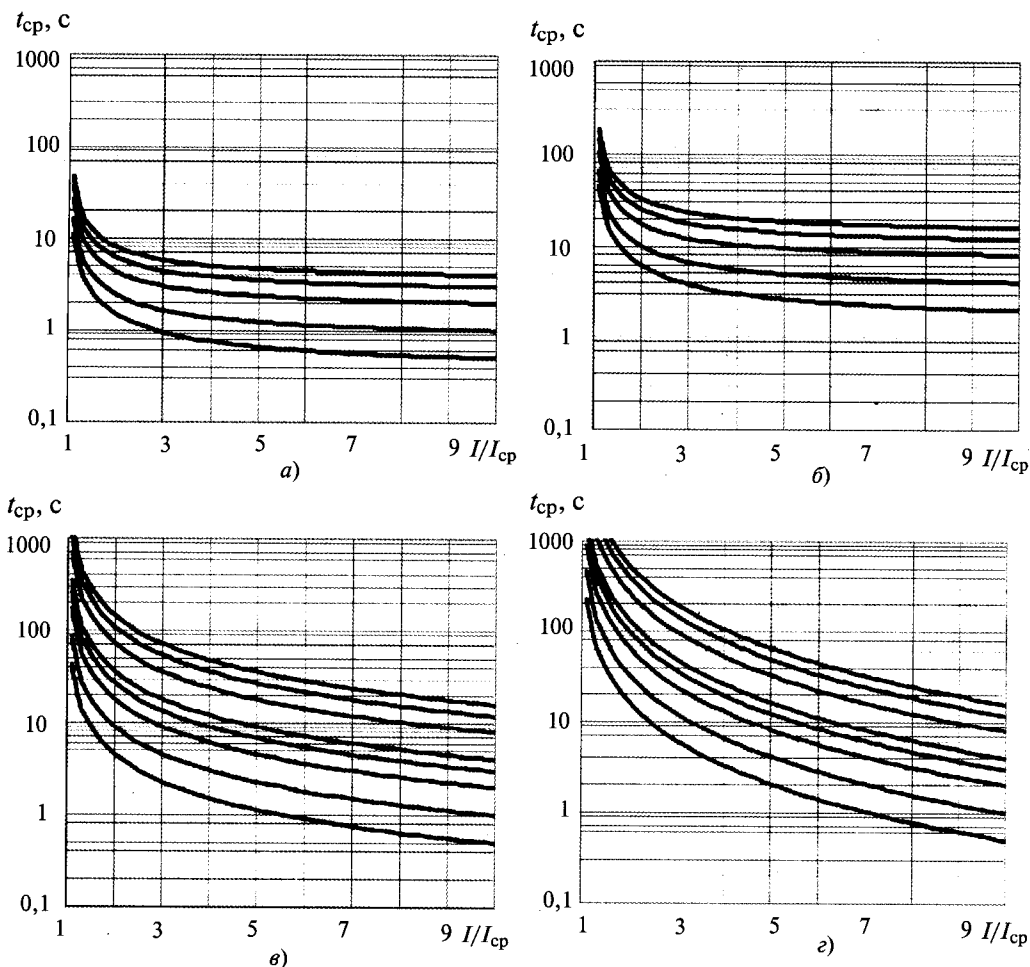


Рис. 3. Времятоковые характеристики реле РСТ80: а – характеристики типа РТ-80 (0,5; 1; 2; 3; 4 с); б – характеристики типа РТ-80 (2; 4; 8; 12; 16 с); в – характеристики типа В (0,5; 1; 2; 3; 4; 8; 12; 16 с); г – характеристики типа С (0,5; 1; 2; 3; 4; 8; 12; 16 с)

$$\sum \frac{\Delta t \left(\left(\frac{I(t)}{I_{\text{ср}}} \right)^2 - 1 \right)}{99t_{10}} \geq 1, \quad (6)$$

где Δt – длительность цикла измерений, равная периоду основной частоты контролируемого сигнала (20 мс при 50 Гц).

Сопоставление характеристик типов *B* и *C* реле РСТ80 с характеристиками смежного оборудования, которые были приведены на рис. 1, позволяет убедиться в лучшем обеспечении селективности по сравнению с характеристикой типа РТ-80 (рис. 4).

Так как на рис. 4 шкала по оси ординат логарифмическая, то сближение кривых в области малых перегрузок свидетельствует о хорошей селективности по времени.

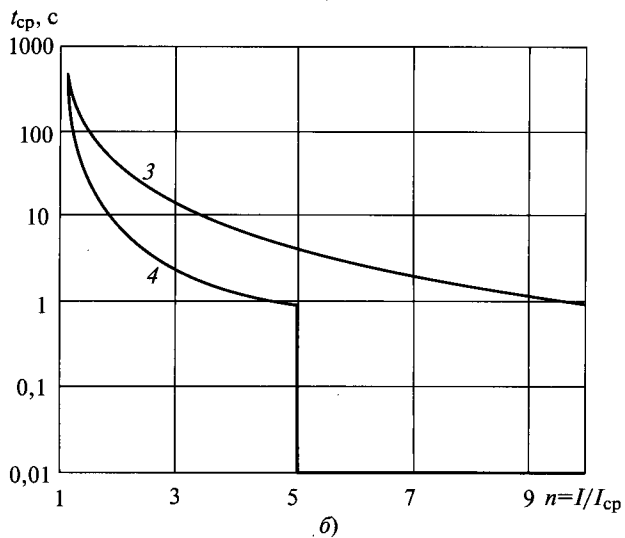
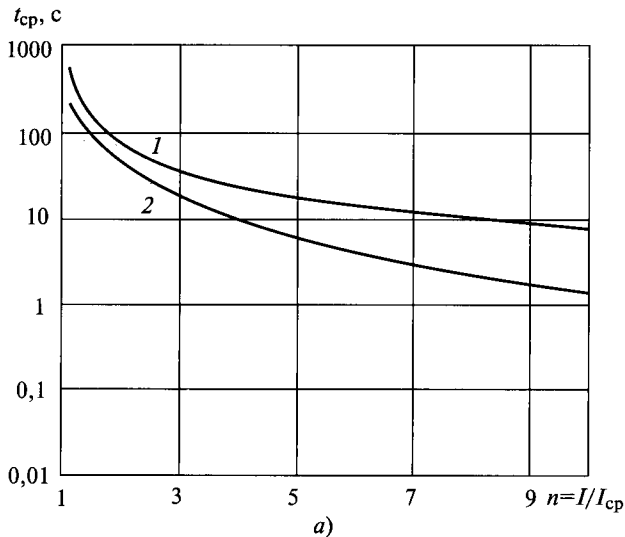


Рис. 4. Примеры использования характеристик типов *B* и *C* реле РСТ80: 1 – характеристика типа *B* ($t_{10}=8$ с); 2 – характеристика перегрузки асинхронного двигателя (одноэкспонентная тепловая модель); 3 – характеристика типа *C* ($t_{10}=1$ с); 4 – характеристика автоматического выключателя

В общем случае, для всех приведённых примеров смежного оборудования, селективность во всём диапазоне токов можно обеспечить с помощью характеристики типа *C*. Однако это достигается ценой увеличения времени срабатывания (характеристика типа *C* проходит выше других). Нельзя также забывать о необходимости согласования характеристик реле с защитами вышестоящего уровня и их уставками, что особенно актуально при частичной модернизации оборудования подстанции. Это накладывает ограничение сверху на применимость характеристики типа *C*.

Как отмечено в [4], защита с характеристикой типа *C* обеспечивает лучшую селективность защиты линии с предохранителем, чем защита с другими характеристиками. Но если повреждается линия, то такая защита будет действовать значительно медленнее, чем при использовании других характеристик.

Таким образом, в ряде случаев целесообразнее применить зависимые от тока характеристики типов РТ-80 или *B*, или независимую, если этот тип характеристики используется в смежных реле защиты. Новые реле РСТ80 предоставляют такую возможность.

Дополнительно, для удобства замены электромеханических реле непосредственно в эксплуатации, РСТ80 может комплектоваться DIN-рейкой 35 мм с отверстиями в местах крепления заменяемого реле. При этом выводы РСТ80 расположены пространственно в тех же местах, что и соответствующие выводы заменяемого реле, что позволяет избежать трудностей при переподсоединении проводов.

Выводы

1. Новые статические реле максимального тока РСТ80 обладают существенными техническими преимуществами перед электромеханическими аналогами:

- отсутствием необходимости в специальных регламентных работах, связанных с разборкой реле и регулированием его механизмов;
- шунтированием/дешунтированием токов до 200 А;
- диапазоном рабочих температур от -40 °С;
- 3 типами зависимых от тока характеристик срабатывания (РТ-80, *B*, *C*) и независимой характеристикой.

2. Возможность выбора из нескольких типов времятоковых характеристик в реле РСТ80 позволяет достичь лучшего согласования с ха-

рактическими защит смежного оборудования, чем это позволяют характеристики электромеханического реле.

3. Не существует «самой лучшей» характеристики для всех ситуаций, и в каждом конкретном случае необходимо её подбирать с учётом параметров защит смежного оборудования.

Список литературы

1. Сушко В.А. Релейная защита присоединений 6–35кВ. Есть ли выход из тупика? // Новости Электротехники. 2006. № 4(40).

2. ГОСТ 51317.6.5-2006 (МЭК 61000-6-5: 2001). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний. Введ. с 27.12.2006.

3. ГОСТ 3698-82. Реле защиты максимального тока низковольтные. Общие технические требования. Введ. с 01.01.1983.

4. Шабад М.А. Расчёты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. СПб.: ПЭИПК, 2003.

Ерохин Евгений Юрьевич – заведующий отделом инжиниринга гибких систем передачи переменного тока ОАО «ВНИИР». Окончил факультет радиоэлектроники и информатики Чувашского ГУ им. И.Н. Ульянова в 1997 г.

ИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

Терморезистивная изоляция монолит-1 класса нагревостойкости Н

ОКНИН Н.С., МАСЛОВ В.А., АСТАФЬЕВ В.В.

Показана возможность создания системы изоляции типа монолит-1 на основе непропитанной стеклослюдинитовой ленты и эпоксицианатного компаунда, обладающей высокими электрическими характеристиками вплоть до 200–220 °С.

Ключевые слова: полиэпоксид, полиизоцианат, монолит-1, стеклослюдинитовая лента.

In this article are described the possibility of creation of high-voltage thermoset insulation with high dielectric properties up to 200–220 °C for VPI technology type monolit-1, on a basis of epoxyisocyanate compound and unimpregnated insulation mica tape.

Key words: polyepoxide, polyisocyanate, VPI, mica tape.

Известно, что высоковольтная изоляция типа монолит-1 класса нагревостойкости F (155 °С), изготавливаемая способом вакуумнагнетательной пропитки с использованием эпоксиангидридного компаунда ПК-11, имеет высокие диэлектрические свойства [1]. Компаунд отверждается в системе изоляции при повышенных температуре и давлении, при этом изделие находится непосредственно в массе пропиточного компаунда. Высокие характеристики достигаются благодаря тому, что усадка компаунда, вошедшего в изоляцию, в процессе его полимеризации компенсируется дополнительной порцией компаунда, поступающей извне под действием избыточного давления. Способ изготовления изоляции по технологии монолит-1 является достаточно дорогостоящим и применяется для ответственных случаев, например, при изготовлении стержней турбо- и гидрогенераторов. Для этих целей возникает в ряде случаев необходимость применения пропиточных компаундов класса нагре-

востойкости Н (180 °С). Существующие отечественные пропиточные компаунды, позиционируемые на этот класс нагревостойкости, типа ЭЛПЛАСТ-180ИД, ЭЛПЛАСТ-220ИД, ЭЛКОМ ПК-21, КП-200, КП-303 являются малоприспособными из-за высоких диэлектрических потерь при температуре 180 °С [2]. Кроме диэлектрических потерь, которые оцениваются значением тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$), признаком пригодности компаунда для изготовления высоковольтной изоляции является малая его усадка при отверждении. Например, для эпоксидного компаунда марки ПК-11 усадка меньше 2%. Перечисленные нагревостойкие компаунды класса Н имеют усадку больше 2%. Из зарубежных компаундов этому требованию удовлетворяет компаунд DOLFON CC 118/LV [2], для которого усадка составляет 0,5%, но он имеет удельное объёмное электрическое сопротивление $\rho_v \leq 2 \cdot 10^7$ Ом·м при 180 °С, т.е. представляет собой при этой температуре полупроводник.

Для высоковольтной изоляции класса награвостойкости Н наиболее близко подходит эпоксиизоцианатный компаунд (ЭПИК) [3], который имеет высокие диэлектрические характеристики. Данная статья посвящена оптимизации технологии изготовления высоковольтной изоляции по системе монолит-1 с использованием этого компаунда.

Основным компонентом ЭПИК является полиизоцианат (ПИЦ). Для отверждения ПИЦ подобран селективный катализатор, нелетучий в вакууме и при повышенной (120 °С) температуре. Компаунд, полученный отверждением ПИЦ в присутствии катализатора, образует очень жёсткую структуру. Для его пластификации вводится эпоксидиановая смола (ЭД), которая, вступая в реакцию с ПИЦ [4], образует оксазолидиноновые циклы и этим эластифицирует отверждённую полимерную матрицу. Количество ЭД ограничивалось отсутствием снижения уровня электрических свойств отверждённого компаунда.

Определённую трудность представляло введение катализатора в исходную смесь смол из-за его плохой растворимости. Введение катализатора в разогретую смесь смол или в одну из них оказалось невозможным из-за его высокой реакционной способности. Для растворения катализатора был подобран инертный нелетучий компонент, который явился к тому же дополнительным пластификатором компаунда. Растворённый при нагревании катализатор после охлаждения раствора не выпадал в осадок. Раствор катализатора вводился в подогретую смесь смол непосредственно перед пропиткой.

Использование смолы ПИЦ требует соблюдения определённых условий. В исходном состоянии ПИЦ представляет собой достаточно низковязкую тёмно-коричневую жидкость, при комнатной температуре её вязкость составляет примерно 45 с по вискозиметру ВЗ-246 (диаметр сопла 4 мм). В процессе хранения при нормальных условиях на поверхности смолы достаточно быстро образуется плёнка — результат взаимодействия смолы с влагой воздуха. Для исключения этого процесса смолу ПИЦ хранили в герметичной таре под неглубоким вакуумом. Часть ПИЦ, необходимую для приготовления компаунда, подвергали глубокому вакуумированию способом закачки тонкой струёй в ёмкость, находящуюся под остаточным давлением 0,7–0,5 мм рт. ст. при температуре 55–60 °С.

Температура пропитки изоляции компаундом ЭПИК составляла 30–35 °С и была выбра-

на из условия достижения вязкости порядка 30 с по вискозиметру ВЗ-246, определённой из зависимости вязкости компаунда от температуры (рис. 1).

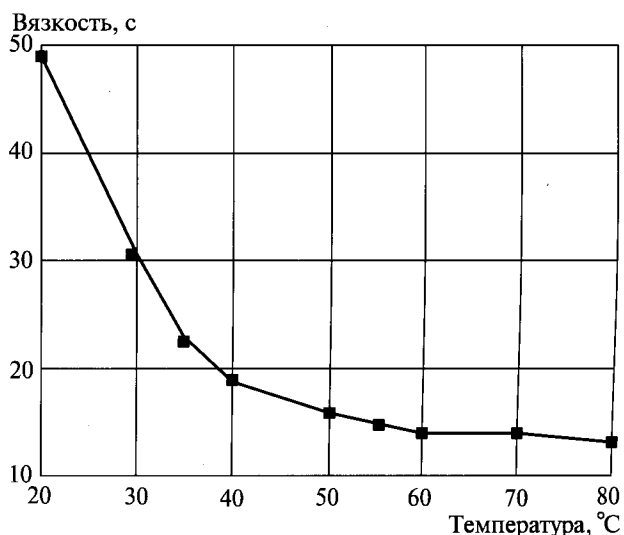


Рис. 1. Зависимость вязкости компаунда ЭПИК от температуры

По литературным данным [4,5] все компоненты эпоксиизоцианатного компаунда, за исключением пластификатора, с той или иной скоростью взаимодействуют друг с другом с образованием твёрдых или смолообразных продуктов. При этом в одних сочетаниях компонентов процессы проходят селективно без выделения газообразных продуктов, а в других возможно образование твёрдых вспененных материалов. Полностью готовый компаунд ЭПИК имеет срок хранения при комнатной температуре около 5–6 ч (нарастание вязкости до 50–60 с по ВЗ-246) и отверждается при нагревании с образованием монолитного образца без газообразных включений. С учётом сказанного ЭПИК готовился непосредственно перед проведением вакуумнагнетательной пропитки.

Для изготовления изоляции по системе монолит-1, когда отверждение изоляции осуществляется непосредственно в массе пропиточного компаунда под давлением, желательно, чтобы начальный период отверждения до момента желирования проходил достаточно быстро и при более низкой температуре, но при этом процесс пропитки изоляции должен быть полностью завершён. По опыту работы с изоляцией монолит-1 на основе эпоксидного компаунда ПК-11 качественная пропитка стеклослюдинитовой изоляции толщиной 2,0–3,0 мм проходила за 2–3 ч при остаточном давлении не выше 0,5 мм рт. ст. на первой стадии, избыточном давлении 8 атм на второй стадии и вязкости компаунда 25–30 с.

При этих условиях срока жизни ЭПИК, определённого ранее, достаточно для проведения пропитки.

На модельных образцах компаунда ЭПИК было установлено, что желирование при температуре 80 °С наступает в течение 5–6 ч. Оптимизация режимов запекания образцов изоляции, пропитанных компаундом ЭПИК, осуществлялась с учётом этих данных.

В качестве изоляционной основы использовалась стеклослюдинитовая лента ЛСКН-160ТТ. Эта лента представляет собой комбинацию слюдинитовой бумаги, покрытой с двух сторон стеклотканевыми подложками, которые приклеены к бумаге небольшим количеством каучука. В ленту, как правило, введён ускоритель марки УП-0628. Необходимо было проверить совместимость изоляционной основы из этой ленты с компаундом ЭПИК. Вообще, проверка совместимости пропиточного компаунда и изоляционной основы является важным моментом при разработке любого вида терморепактивной изоляции. В данном случае необходимо было проверить совместимость компаунда ЭПИК с веществами, содержащимися в ленте ЛСКН-160ТТ, такими как замасливатели стеклотканевые, каучук, ускоритель УП-0628. Из перечисленных веществ ускоритель является наиболее активным компонентом.

Для выявления влияния ускорителя УП-0628 на свойства разрабатываемой изоляции были проведены два опыта. В первом опыте ускоритель вводится непосредственно в компаунд вместо катализатора. Отверждение компаунда при температуре 80 °С прошло с образованием пузырей по всему объёму образца. Во втором опыте компаундом марки ЭПИК пропитывалась изоляция, образованная намоткой ленты ЛСКН-160ТТ, содержащей ускоритель УП-0628. Изоляция, запечённая по ступенчатому режиму, оказалась некачественной – имела «глухой» звук при простукивании, являющийся следствием образовавшихся пустот, большой прирост $\text{tg}\delta$ (около 10%) и низкую электрическую прочность – ниже 20 МВ/м. В дальнейшем во всех опытах использовалась лента ЛСКН-160ТТ, не содержащая ускоритель.

Исследование режима запечки изоляции, пропитанной компаундом ЭПИК, осуществлялось с учётом рекомендаций разработчика компаунда – по ступенчатому режиму с таким расчётом, чтобы начальная стадия отверждения наиболее полно проходила при достаточ-

но низкой температуре, когда образуется более плотная упаковка полимерной матрицы. Для этой цели определялась тангенсограмма процесса отверждения изоляции макетов, пропитанных вакуумнагнетательным способом компаундом ЭПИК при температуре 30–35 °С. Ти-

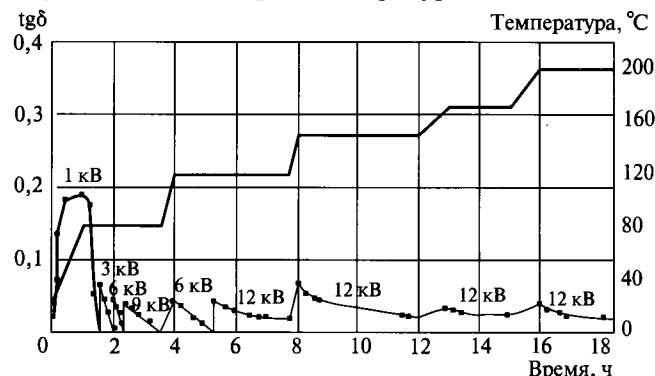


Рис. 2. Тангенсограмма процесса отверждения макета

пичная тангенсограмма приведена на рис. 2

При снятии тангенсограммы в начальный период на макет подавалось небольшое испытательное напряжение, равное 1 кВ, при котором не происходил пробой изоляции. При достижении $\text{tg}\delta$ минимальных значений испытательное напряжение повышалось, обычно ступенчато: 3, 6, 9, 12 кВ. Температуру также поднимали ступенчато – 80, 120, 150, 170, 200 °С. По тангенсограммам можно было определить необходимое время выдержки макета при каждой температуре. Оно составляло от 2 до 4 ч. Судя по интенсивности изменения $\text{tg}\delta$ основной процесс отверждения проходит при 80–120 °С. Как видно из рис. 2, значения $\text{tg}\delta$ при 200 °С стабилизировались на уровне 2% при напряжении 12 кВ (напряжённость 6 МВ/м), что является отличным результатом для высоковольтной изоляции.

Для изоляции монолит, изготавливаемой из непропитанной стеклослюдинитовой ленты, определённое значение для свойств готовой изоляции имеет температура сушки макетов перед пропиткой компаундом. По опыту работы с изоляцией монолит-2 установлено, что высокие диэлектрические свойства готовой изоляции получаются при условии предварительной термической сушки при температуре равной или даже несколько больше, чем максимальная температура запекания изоляции. Это связано с тем, что стеклослюдинитовая лента в исходном состоянии содержит до 1% летучих веществ – воду и остатки растворителя. Слюдяная бумага содержит как адсорбированную воду, так и кристаллогидратную [1].

Последняя выходит из бумаги вплоть до 400–450 °С. Если изоляцию сушить при более низкой температуре по сравнению с максимальной температурой запекания, то при отверждении может произойти некоторое выделение газообразных продуктов, которое приведёт к нарушению монолитности изоляции.

Было проведено две серии опытов. В первой серии предварительная сушка макетов изоляции проводилась в интервале температур 120–200 °С в течение 12 ч. Для сравнения был испытан образец, не подвергавшийся предварительной сушке. Критерием оценки монолитности изоляции служили изменения $\text{tg}\delta$ в зависимости от напряжения. Поскольку значения $\text{tg}\delta$ изготовленной изоляции оказались низкими, то измерения $\text{tg}\delta$ осуществлялись при напряжениях 3–15 кВ и иногда при 3–21 кВ. Данные представлены в табл. 1. Как видим, увеличение температуры предварительной сушки макетов приводит к стабильному снижению диэлектрических потерь как при комнатной температуре, так и при 180 °С.

Вторая серия макетов испытывалась после предварительной сушки при температурах 200–300 °С и максимальных температурах отверждения 200–240 °С. На этой серии макетов проверялось также влияние на электрические характеристики дополнительной термообработки при повышенных температурах (табл. 2).

Обе серии испытаний показали, что изоляция ЭПИК имеет низкие значения $\text{tg}\delta$ при достаточно высоких температурах (180–200 °С) и режим изготовления изоляции, при котором температура предварительной сушки изоляции должна быть не ниже температуры запекания, является верным. Для полностью отвержденной изоляции значения $\text{tg}\delta$ начинают

значительно возрастать только при температуре выше 220 °С, т.е. изоляция ЭПИК имеет значительные запасы по устойчивости к воздействию высоких температур.

Дополнительная термообработка макетов при температуре 220 °С в течение 12 ч привела к ещё большему снижению диэлектрических потерь. Эти испытания показали также, что температура предварительной сушки 300 °С является избыточной и несколько ухудшает электрические характеристики макетов. Ухудшение характеристик было отмечено и после дополнительной термообработки макетов при температуре 240 °С. Визуальное обследование макетов показало, что в этом случае под поверхностным слоем изоляции появляются пятна, свидетельствующие об его частичном отслоении. Очевидно, проходят дополнительные процессы термодеструкции, которые, скорее всего, связаны с разложением остатков каучука, замасливателя, выделением кристаллогидратной воды. Начало термодеструкции отвержденного компаунда ЭПИК по нашим и литературным [4] данным наблюдается при температурах выше 320–350 °С.

Следует отметить, что у полученной системы изоляции при 260 °С $\text{tg}\delta = 20 \div 25\%$, в то время как компаунды, упомянутые в начале статьи, такого же уровня диэлектрических потерь достигают уже к температурам 150–170 °С, т.е. практически на 100 °С ниже.

На основании полученных результатов был выбран следующий режим изготовления изоляции ЭПИК по системе монолит-1: предварительная сушка 200–220 °С – 16 ч; запекание 90 °С – 6 ч, 120 °С – 4 ч, 170 °С – 2 ч, 200 °С – 2 ч, 220 °С – 2 ч. Согласно этому режиму была изготовлена контрольная партия макетов, изоляционная основа которых была обра-

Таблица 1

Зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры предварительной сушки макетов

Режим запекания	Температура измерения, °С	Напряжение измерения, кВ	$\text{tg}\delta$			
			Температура сушки, °С			
			20	120	160	200
80°С – 6 ч 120°С – 4 ч 150°С – 2 ч 170°С – 2 ч 180°С – 2 ч	20	<6	0,001	0,001	0,001	0,001
		9	0,0143	0,0125	0,0128	0,0130
		12	0,0234	0,0215	0,0196	0,0172
		15	0,0292	0,0256	0,0205	0,0192
	180	<6	0,001	0,001	0,001	0,001
		9	0,0197	0,0143	0,0118	0,0037
		12	0,0310	0,0234	0,0183	0,0120
		15	0,0375	0,0319	0,0297	0,0278

Таблица 2

Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры предварительной сушки макетов и дополнительной термообработки

Режим запекания	Температура измерения, °C	Напряжение измерения, кВ	$\operatorname{tg}\delta$		
			Температура сушки (12 ч), °C		
			200	250	300
90°C – 6 ч 120°C – 4 ч 150°C – 4 ч 170°C – 4 ч 200°C – 2 ч	20	<12	<0,001	<0,001	<0,001
		15	0,0055	0,004	<0,001
		18	–	–	<0,001
		21	–	–	0,0035
	180	<16	<0,001	<0,001	<0,001
		9	0,013	0,011	0,011
		12	0,019	0,018	0,018
		15	0,025	0,024	0,027
	200	3	0,019	<0,001	<0,011
		6	0,051	0,016	0,034
		9	0,056	0,028	0,045
		12	0,058	0,035	0,052
15		0,065	0,044	0,059	
Дополнительная термообработка 220°C – 3 ч	200	3	<0,001	<0,001	<0,001
		6	0,012	0,011	0,014
		9	0,021	0,024	0,030
		12	0,029	0,028	0,040
		15	0,036	0,034	0,046
Дополнительная термообработка 220°C – 9 ч	200	<6	<0,001	<0,001	<0,001
		9	<0,001	<0,001	0,002
		12	0,004	<0,001	0,015
		15	0,013	0,010	0,026
		Дополнительная термообработка 220°C – 6 ч 240°C – 6 ч	200	<6	<0,001
9	0,011			0,011	0,017
12	0,021			0,022	0,033
15	0,033			0,035	0,062
220	3		<0,001	<0,001	<0,001
	6		<0,001	0,001	0,006
	9		0,014	0,015	0,031
	12		0,025	0,029	0,053
	15		0,038	0,046	0,083
240	3		0,025	0,032	0,059
	6		0,050	0,064	0,094
	9		0,062	0,077	0,113
	12		0,066	0,087	0,125
	15		0,074	0,095	–
260	3		0,087	0,108	0,141
	6		0,137	0,158	0,187
	9		0,156	0,186	0,216
	12		0,178	0,200	0,236
	15		0,205	0,215	0,261

зована намоткой 6 слоёв ленты ЛСКН-160ТТ в полнахлёста. Измеренные значения $\operatorname{tg}\delta$ изоляции макетов в температурном диапазоне 20–220 °C приведены в табл. 3.

Среднее значение электрической прочности изоляции при комнатной температуре 32 МВ/м. Судя по характеристикам самого компаунда можно ожидать, что электрическая прочность изоляции при температурах 180–200 °C окажется также высокой.

Таким образом, показана возможность создания системы изоляции типа монолит-1 на основе эпоксиизоцианатного компаунда ЭПИК, обладающей высокими электрическими характеристиками вплоть до 200–220 °C.

Таблица 3

Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры

Температура, °C	$\operatorname{tg}\delta$		
	Напряжение измерения, кВ		
	6	9	12
20	<0,001	<0,001	<0,001
130	<0,001	0,008	0,012
155	<0,001	0,005	0,012
180	<0,001	0,007	0,015
200	<0,001	0,009	0,020
220	0,01	0,041	0,092

Технологические параметры проведения процесса вакуумнагнетательной пропитки и дальнейшая запечка изоляции могут варьироваться в зависимости от конструкции и габаритов изделия.

Список литературы

1. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого. М.: Энергия, 1974.
2. Маслов В.А., Окнин Н.С., Гроздов А.Г., Панов А.А. Пропиточные компаунды класса нагревостойкости Н-С // Электротехника. 2009. № 11. С. 32–38
3. Маслов В.А., Гроздов А.Г., Окнин Н.С. и др. Химстойкость электроизоляционного эпоксиизоцианатного компаунда // Электротехника. 2010. №12. С.40–42.
4. Погосян Г.М., Панкратов В.А., Заплишный В.Н., Мацоян С.Г. Политриазины. Ереван: Изд. АН АССР, 1987.

5. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам: Пер. с англ./ под ред. Н.В. Александрова. М.: Энергия, 1973.

Окнин Николай Сергеевич — начальник лаборатории ФГУП ВЭИ, канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1970 г. Защитил диссертацию по теме «Системы электрической изоляции высоковольтных машин» в 1980 г.

Маслов Владимир Алексеевич — начальник лаборатории ФГУП ВЭИ, канд. хим. наук. Окончил факультет технологии органических веществ МХТИ им. Д.И.Менделеева в 1974 г. Защитил диссертацию по теме «Молекулярно-массовое распределение эпоксидных олигомеров и его влияние на образование и свойства сетчатых полимеров» в 1987 г.

Астафьев Владимир Викторович — зам. начальника лаборатории ФГУП ВЭИ. Окончил Институт электротехники МЭИ (ТУ) в 2009 г.

Полиэфиримидные компаунды — основа систем изоляции современных тяговых электродвигателей

ЕВТУШЕНКО Ю.М., ОГОНЬКОВ В.Г., СИДОРЕНКО К.С., ЯЩЕНКО С.А.

Представлен краткий обзор систем изоляции электрических машин и пропиточных компаундов, как одного из ключевых компонентов системы изоляции. Показаны возможности производства и переработки различных типов компаундов отечественного производства. Описаны свойства стеклослюдинитовых лент, содержащих в качестве связующего пропиточный компаунд.

Ключевые слова: системы изоляции, компаунды, стеклослюдинитовые ленты.

Ключевую роль при изготовлении и ремонте электрических машин с целью повышения или поддержания их технического уровня играют электроизоляционные материалы и системы изоляции на их основе, позволяющие обеспечить повышение рабочих температур, уменьшение толщины изоляции, увеличение её теплопроводности. Особенно остро эти вопросы встают при создании новых типов электрооборудования, предназначенного для тяжелых или экстремальных условий эксплуатации.

Значительный прогресс в этом был достигнут в конце 60 — начале 70 годов, когда была разработана и широко внедрена в производство изоляция монолит-2. Система изоляции монолит-2 основана на изоляции обмоток сухими стеклослюдинитовыми лентами с последующей пропиткой под вакуумом и давлением эпокси-ангидридным компаундом ПК-11 [1, 2].

Short review of electric machines' insulating systems and impregnating compounds as one of the key component of insulating system is represented. It's shown the opportunity of manufacturing and application domestic compounds of different types. The article describes main properties of mica-glass types on the baize of impregnating compound.

Key words: insulating systems, compounds, micaglass types.

Использование изоляции монолит-2 за счёт высоких механических, электрофизических характеристик и теплопроводности взамен ранее применяемой изоляции на основе микаленты позволили на долгие десятилетия стать самой распространённой изоляцией по классу нагревостойкости F. Так, проведённые в ВЭЛНИИ сравнительные испытания теплопроводности различных типов изоляции на натуральных обмотках тяговых электродвигателей электровозов показали неоспоримое преимущество монолит-2 по сравнению с другими видами изоляции (рис. 1).

Распределение температур на поверхности изоляции монолит-2 имеет наиболее однородный характер. Неоднородность тепловой картины наблюдается только в отдельных местах, но максимальная разность температур на отдельных участках поверхности катушек не

превышает 10°С. Таким образом, по значению коэффициента теплопроводности наиболее эффективной является изоляция монолит-2, которая и рекомендуется к применению в узлах тяговых электродвигателей современных локомотивов [3].

К настоящему времени эксплуатируются десятки тысяч двигателей с изоляцией монолит-2: в магистральных электровозах и тепловозах, пригородных поездах, городском транспорте – трамваях, троллейбусах, метро, где они показали высокую степень надёжности. Изоляцию монолит-2 и в настоящее время наиболее широко применяют в производстве обмоток электрических машин класса нагревостойкости F.

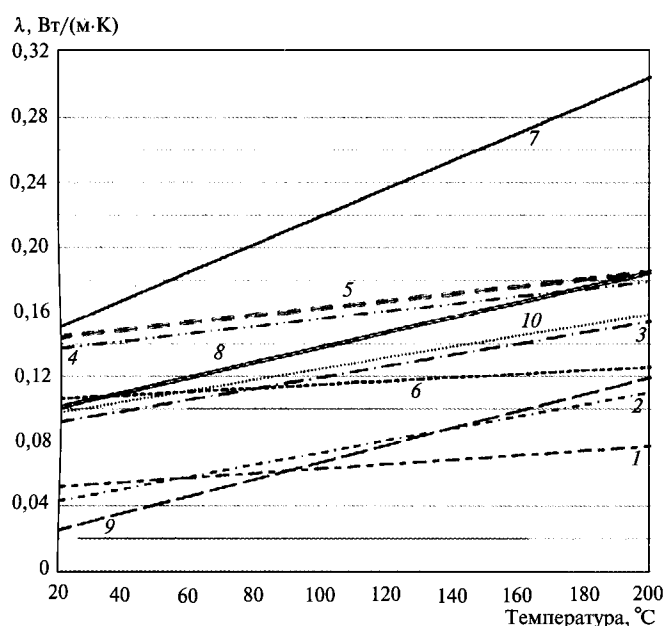


Рис. 1. Зависимость теплопроводности различных систем изоляции от температуры: 1 – катушка главного полюса ТД НБ 418к6 с изоляцией ЛМК-ТТ; 2 – катушка добавочного полюса ТД НБ 418к6 с изоляцией ЛМК-ТТ; 3 – катушка главного полюса ТД НБ501 с изоляцией монолит-2; 4 – катушка добавочного полюса ТД НБ501 с изоляцией монолит-2; 5 – катушка главного полюса ТД НБ508А с изоляцией монолит-2; 6 – катушка добавочного полюса ТД НБ508А с изоляцией монолит-2; 7 – катушка якорная ТД НБ501 с изоляцией монолит-2; 8 – катушка якорная ТД НБ508А с изоляцией монолит-4; 9 – компенсационная обмотка ТД НБ418к6 с изоляцией ЛСЭК-5СПл; 10 – катушка якорная ТД НБ418к6 с изоляцией ЛСЭК-5СПл

Повышение требований к нагревостойкости различных систем изоляции, наметившееся в последние годы, потребовало разработки новых пропиточных компаундов классов нагревостойкости Н и С на основе ненасыщенных олигоэфиримидов и их модификаций. Разработаны также эпоксидные и кремнийорганические компаунды, однако их стоимость оказалась очень высокой, поэтому они применяются только в специальных изделиях.

К новым термостойким пропиточным компаундам относятся, в частности, полиэфиримидные и модифицированные полиэфиримидные компаунды Damisol 3308, Damisol 3309 и Damisol 3340 фирмы «Von Roll Isola», компаунд Е-4011 фирмы «Du Pont Herberts Electro», а также отечественные компаунды Элпласт-155ИД, Элпласт-180ИД и Элпласт-220ИД.

В качестве активных разбавителей в полиэфиримидных компаундах используют стирол, винилтолуол, диаллилфталат или олигоэфиракрилаты. Из числа последних наиболее часто применяют диметакриловый эфир триэтиленгликоля (олигоэфиракрилат ТГМ-3). Стиролсодержащие компаунды являются наиболее многочисленными. Они относительно дешевы, обладают хорошими технологическими, физико-механическими и электрическими свойствами. Однако при их переработке из-за летучести и токсичности стирола требуется специальное герметичное оборудование.

Применение винилтолуола позволяет, с одной стороны, улучшить экологические показатели (гораздо меньшая летучесть и токсичность по сравнению со стиролом), повысить термостойкость и электрофизические характеристики, но, с другой стороны, приводит к существенному повышению цены. Использование практически нелетучего и малотоксичного диаллилфталата в ещё большей степени улучшает экологические свойства и повышает термостойкость. Однако этот разбавитель применяется редко, так как компаунды на его основе имеют очень высокую вязкость и низкую скорость отверждения и; кроме того, весьма дороги.

По нашему мнению, по совокупности свойств наибольший интерес представляют компаунды, содержащие в качестве активных разбавителей низковязкие нелетучие и нетоксичные олигоэфиракрилаты. К их числу относятся выпускаемые ЗАО «Электроизолит» компаунды Элпласт-155ИД, Элпласт-180ИД и Элпласт-220ИД на основе олигоэфиракрилата ТГМ-3.

Основными недостатками многих компаундов на основе стирола и винилтолуола является летучесть разбавителей и высокая экзотермичность отверждения, в результате чего при отверждении в толстых слоях появляются раковины и трещины. В связи с этим оценить электрические свойства некоторых импортных компаундов на обычных образцах – дисках диаметром 100 мм и толщиной 1 мм – из-за их растрескивания в процессе отверждения не

Сравнительные характеристики полиэфиримидных компаундов нагревостойкости Н, испытанных в ЗАО «Электроизолит»

Характеристика	Марка компаунда, фирма						
	Damisol, «Von Roll Isola»			IK, «Du Pont Herberts Electro»	Элпласт, ЗАО «Электроизолит»		
	3308	3309	3340	Е-4011	180 ИД А/В	180ВТ	180СТ
Активный разбавитель	Стирол	Винилтолуол	Винилтолуол	Акрилат	ТГМ-3	Винилтолуол	Стирол
Температура вспышки	32	51–53	51–53	–	94	51–53	32
Вязкость: –при 23°C, мПа·с (сПз) –при (50±2)°C (ВЗ-246, 4 мм), с	150±15 –	170±15 –	300/500±30/50 –	2250±250 –	– 30–80/20–40	57 –	125 –
Время гелеобразования, мин: –при 100 °C –при 110 °C –при 120 °C –при 130 °C –при 150 °C	8–16 3–6 2–3 1–2 –	– 3–6 2–3 1–2 –	– 4–6 2–4 – –	10±3 – – – –	– – – – –	– – – – –	– – – – –
Количество компонентов	1 (2)	1 (2)	1	1	2 (1)	2 (1)	2 (1)
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м: –R, M (25°C); 45–75% –R, M (155°C); <20% –R, M (180°C); <20% –24 ч (23°C) 93%, M (15–35°C); 45–75%	1,9·10 ¹⁴ 5·10 ¹⁰ – –	1,9·10 ¹⁴ 5·10 ¹⁰ 1,4·10 ¹⁰ –	1,3·10 ¹³ (1–2)·10 ¹⁰ – 1·10 ¹³ 24 ч в воде	1·10 ¹⁴ 1·10 ¹¹ – 1·10 ¹³ 96 ч в воде	>1·10 ¹³ – >5·10 ⁸ >5·10 ¹⁰	3,9·10 ¹⁴ – 3,3·10 ¹² 6,7·10 ¹²	5,8·10 ¹⁴ – 5,8·10 ¹⁰ 1·10 ¹²
E _{пр} , МВ/м –23 °C; 45–75% –24 ч (23 °C) 93%	130–170* (25 мин) –	130–170* (25 мин) –	~100* (~80 при 155°C) ~60	85* 65*	>25 (диски)** >22 (диски)**	27,3 (диски)** 22,7 (диски)**	28,2 (диски)** 23,3 (диски)**
Просыхание в толстом слое, мин		30			<30 (по ТУ)	30	30
Цементирующая способность (по методу пучка), Н: –при (20±0,5) °C –при (180±2) °C	– 190	– 150	141	82	>392 (по ТУ) >196	640 135	647 122
Тангенс угла диэлектрических потерь (1000 Гц): –при (20±0,5) °C –при (130±2) °C –при (155±2) °C –при (180±2) °C	0,005 (23°C) – 0,028 –	0,005 (23°C) – 0,028 –	– – – –	0,02 (23°C) – – –	0,007 0,053 (120°C) 0,33 (150°C) –	0,005–0,013 0,04–0,0505 0,05–0,101 0,07–0,15	0,0025 – 0,052 0,074
Рекомендуемый режим отверждения пропитанных изделий	8 ч 130°C (4–6 ч × 150°C)	8 ч × 150 °C	8 ч × 150 °C	2 ч×130°C (1 ч×150°C)	4 ч×130 °C + 4 ч×160 °C	4 ч×150 °C (2 ч×130 °C+ 2 ч×160 °C)	4 ч×150 °C 2 ч×130 °C + 2 ч×160 °C)
Гарантийный срок хранения без введенного инициатора, мес, не менее	18 (23°C)	12(<15°C)	18 (23°C)	6 (<25°C)	по ТУ 12 (по факту до 18)	~12	~12
Длительная рабочая температура, °C	180–200						
Диапазон нагревостойкости, °C: –по цементирующей способности (спиральные катушки) –по электрической прочности (диски)	– –	– –	– –	– –	– –	195/216/214 – 201/229/213	– – –

* – в слое толщиной 25 мкм (0,025 мм)

** – в слое толщиной (1±0,1) мм

представляется возможным. В то же время сопоставительный анализ технических характеристик компаундов позволяет сделать вывод о том, что электрофизические свойства компаундов приблизительно одинаковы.

Нами изучены некоторые технологические и технические характеристики ряда перечисленных отечественных и импортных полиэфиримидных компаундов. Испытания проведены по отечественным методикам (таблица).

Следует отметить, что ЗАО «Электроизолит» имеет возможность выпускать полную «линейку» полиэфиримидных компаундов на любом из вышеперечисленных активных разбавителей, т.е. на стироле, винилтолуоле, диаллилфталате и олигоэфиракрилате ТГМ-3 по требованию потребителей. В таблице приведены свойства соответствующих полиэфиримидных компаундов на базе одного и того же ненасыщенного олигоэфиримидизоцианурата — основы компаунда Элпласт-180ИД и различных активных разбавителей.

Компаунды ЗАО «Электроизолит» защищены патентом РФ [4].

Важной составляющей в применении пропиточных составов являются технологические свойства. Учитывая имеющееся оборудование на заводах для вакуум-нагнетательной пропитки, одной из важнейших характеристик компаунда является **срок жизни**, т.е. изменение вязкости компаундов в процессе многократных пропиток. На рис. 2 приведены кривые изменения вязкости пропиточных компаундов Элпласт-155ИД в сравнении с эпоксидным компаундом ПК-11 [5] и компаунда Элпласт-180ИД (рис. 3) от времени хранения при 50°C.

Как показывают приведённые данные, вязкость обоих компаундов в этих условиях соответствует рабочему диапазону более месяца.

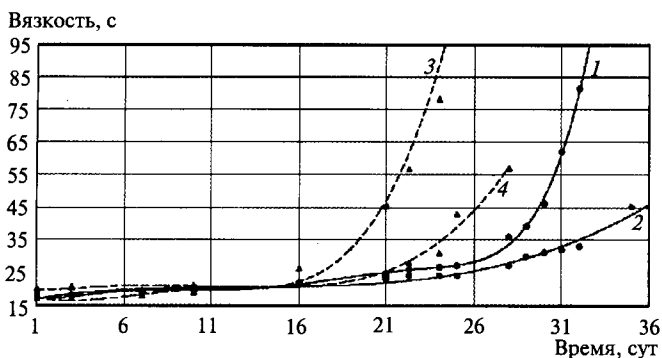


Рис. 2. Изменение вязкости компаундов ПК-11 и Элпласт-155ИД при 50°C (ВЗ-246, диаметр 4 мм) с введённым отвердителем от времени хранения: 1 — Элпласт-155ИД без обновления; 2 — Элпласт-155ИД с обновлением; 3 — ПК-11 немодифицированный [5]; 4 — ПК-11 модифицированный [5]

Многолетнее использование этих компаундов показало, что в заводских условиях при соблюдении температурных режимов пропитки и соответствующего обновления, срок жизни компаундов практически не ограничен.

На основе компаунда Элпласт 180-ИД разработана и запатентована новая система изоляции Термолит, которая реализована за счёт

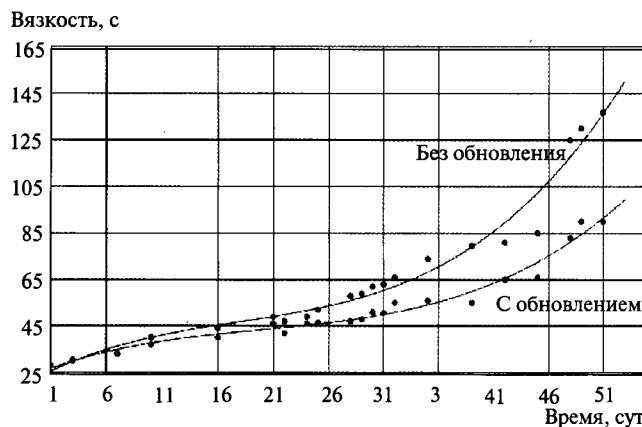


Рис. 3. Изменение вязкости компаунда Элпласт-180ИД при 50°C (ВЗ-246, диаметр 4 мм) с введённым отвердителем от времени хранения

новых технологических решений при изготовлении всех компонентов, входящих в систему изоляции обмоток электродвигателей [6].

Технология изготовления основной корпусной изоляции двигателей — стеклослюдинитовых лент — претерпела значительные изменения. В лентах Элизтерм в качестве связующего используется компаунд Элпласт-180ИД, не выделяющий летучие соединения в процессе изготовления лент. Это позволило коренным образом изменить технологию и технологическое оборудование для изготовления этих лент. Оригинальность решений подтверждена полученными патентами [7, 8].

Одной из отличительных характеристик олигоэфиримидных компаундов является короткое время желатинизации в толстом слое — менее 30 мин при температуре не менее 130°C и непродолжительное время полного отверждения.

На рис. 4 приведены данные по времени полимеризации связующего в ленте Элизтерм-180ТПМ при различных температурах отверждения. Так, полное отверждение связующего при температуре 180°C происходит в диапазоне 6–10 ч.

Использование компаунда для изготовления лент и последующей пропитки изолированной обмотки имеет следующие преимущества перед традиционными видами изоляции:

- лента сохраняет эластичность в течение гарантийного срока хранения (1 год);
- связующее в ленте обладает способностью к «повышенной текучести» при пропитке под давлением;
- отпадает необходимость термообработки (сушки) обмоток перед пропиткой;
- сокращает в 3–4 раза процесс отверждения изоляции;
- обеспечивает дополнительную «допропитку» витковой изоляции.

Проведены сравнительные исследования по определению текучести лент Элизтерм и

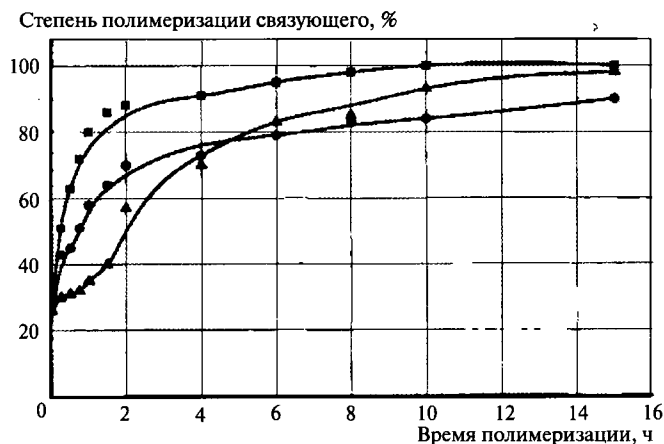


Рис. 4. Время полимеризации связующего в ленте Элизтерм-180ТММ при различных условиях термостатирования: ■ — 180°C; ● — 160°C; ▲ — ступенчатый нагрев (130°C–2ч, 160°C–4ч, 180°C–4ч)

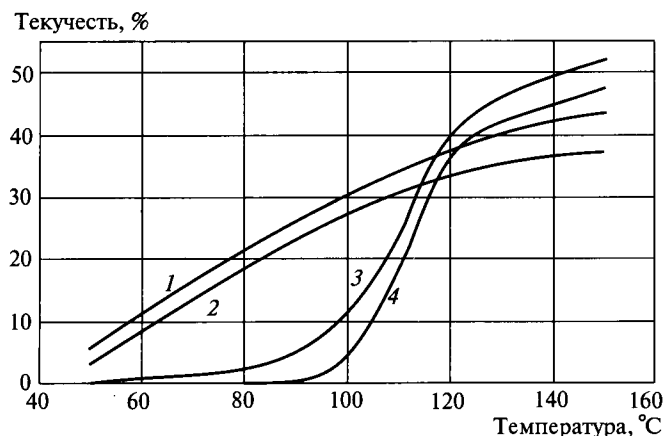


Рис. 5. Зависимость текучести связующего из пропитанной слюдинитовой ленты при опрессовке в течение 5 мин от температуры: 1 — лента Элизтерм (6 атм.); 2 — лента Элизтерм (2 атм.); 3 — лента ЛСЭК-5 (6 атм.); 4 — лента ЛСЭК-5 (2 атм.)

ЛСЭК-5 в стадии поставки и после 1 года и 6 мес хранения соответственно в зависимости от давления и температуры.

Текучесть связующего определялась по ГОСТ 26103-84 (п. 5.18). Приведённые на рис. 5 и 6 результаты этих исследований показали, что связующее в ленте Элизтерм обладает хо-

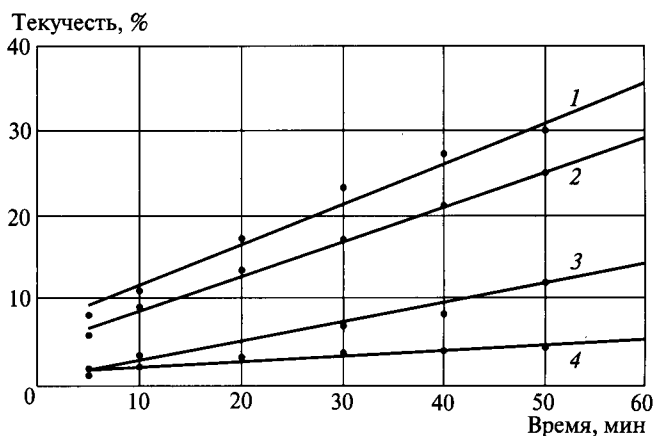


Рис. 6. Зависимость текучести связующего из пропитанной слюдинитовой ленты при давлении 6 атм. и 50 °C от времени опрессовки: 1 — лента Элизтерм (стадия поставки); 2 — лента Элизтерм (год хранения); 3 — лента ЛСЭК-5 (стадия поставки); 4 — лента ЛСЭК-5 (6 мес хранения)

рошей текучестью при температурах пропитки 50–80°C и давлении 2–6 кгс/см². Это, в свою очередь, обеспечивает значительное повышение пробивных напряжений корпусной и витковой изоляции.

Выводы

1. Проведены сравнительные испытания отечественных и зарубежных пропиточных компаундов, обоснован выбор активного разбавителя для компаунда Элпласт-180ИД.
2. Использование компаунда Элпласт-180ИД в качестве связующего в стеклослюдинитовых лентах позволило создать эффективную систему изоляции класса нагревостойкости Н.

Список литературы

1. Н.В. Александров, С.Г. Трубаев, В.Г. Огоньков и др. Способ изготовления обмотки электрических машин // А.С. 365007 СССР. Оpubл. 1972.
2. Александров Н.В., Трубаев С.Г., Огоньков В.Г. и др. Изоляция монолит-2 для тягового электромашиностроения // Электротехника. 1972. №5.
3. Головач Ю.Н., Кубил В.О., Щербаков В.Г. Исследование теплопроводности изоляции катушек тяговых двигателей электровозов. // Электровозостроение. Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 2005. С. 284–293.
4. Пат. 2294345 РФ. Электроизоляционный пропиточный компаунд и способ его получения / К.С. Сидоренко, Ю.М. Евтушенко, В.К. Комарова и др. Оpubл. 27.02.2007. Бюл. № 6.
5. Гроздов А.Г., Кардаш И.Е., Огоньков В.Г., Финкель Ф.Ф. Исследование свойств термореактивной изоляции, пропитанной модифицированным компаундом // Электротехника. 1988. №11. С. 53.
6. Пат. 2366060 РФ. Способ изготовления изоляции обмоток электрических машин / В.В. Иванов, В.Г. Огоньков, К.С. Сидоренко, С.А. Ященко. Оpubл. 27.08.2009. Бюл. № 24.
7. Пат. 2291885 РФ. Электроизоляционный материал / В.К. Комарова, Э.К. Доброва, К.С. Сидоренко и др. Оpubл. 20.01.2007. Бюл. № 2.

8. Пат. 2294345 РФ. Способ изготовления пропитанных лент для изоляции электрических машин / В.И. Лебедев, А.П. Биржин, В.Г. Огоньков. Опубл. 27.02.2009. Бюл. № 6.

Евтушенко Юрий Михайлович – начальник научно-технического центра ЗАО «Электроизолит» (г. Хотьково), доктор хим. наук. Окончил факультет физико-математических и естественных наук Российского университета дружбы народов в 1980 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Новые реакции в функциональном анализе при аналитическом контроле производства конденсационных полимеров» в МГУ им. М.В. Ломоносова в 2002 г.

Огоньков Вячеслав Григорьевич – консультант по электроизоляционным материалам и системам изоляции НТЦ ЗАО «Электроизолит», канд. техн. наук. Окончил факультет электроизоляционной и кабельной техники МЭИ в 1967 г. Защитил диссертацию по теме «Разработка и исследование изоляции

монолит-2 для статорных обмоток высоковольтных электрических машин и генераторов» во ВНИИКТ в 1982 г.

Сидоренко Константин Степанович – научный консультант по химии полимеров НТЦ ЗАО «Электроизолит». Окончил факультет органического синтеза и синтеза полимеров Московского института тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова в 1971 г.

Яценко Сергей Александрович – начальник лаборатории разработки систем электрической изоляции НТЦ ЗАО «Электроизолит», канд. техн. наук. Окончил институт электротехники МЭИ в 2003 г. Защитил диссертацию по теме «Модернизация и исследование системы электрической изоляции класса нагревостойкости Н и тяговых двигателей, эксплуатируемых в экстремальных условиях» в МЭИ в 2009 г.

ТРАНСФОРМАТОРЫ

О физических процессах изменения магнитных свойств электротехнической стали и росте потерь холостого хода силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации

ЦИЦОРИН А. Н.

Проведены измерения потерь холостого хода силовых трансформаторов в условиях эксплуатации, показано, что со сроком службы потери в силовых трансформаторах возрастают. Исследованы причины увеличения потерь холостого хода в силовых трансформаторах.

Ключевые слова: удельные магнитные потери, старение стали, механические напряжения, коэрцитивная сила, неметаллические включения.

Потери в силовых трансформаторах и автотрансформаторах составляют существенную долю (до 20%) общих потерь электроэнергии в электрических сетях и являются одной из составляющих нормативов технологических потерь электроэнергии на её передачу [1]. От точности расчёта потерь электроэнергии ХХ в трансформаторах и автотрансформаторах (особенно на электрических станциях) зависит точность расчёта нормативов технологических потерь и, в конечном счёте, тариф на услуги по передаче электрической энергии.

В последние годы всё большее число авторов обращает внимание на рост потерь элек-

Measurements of losses of idling of power transformers under operating conditions are spent. Measurements have shown that with loss service life in power transformers increase. The reasons of increase in losses of idling in power transformers are investigated.

Key words: specific magnetic losses; steel aging, mechanical pressure, koertsitivnaja force, nonmetallic inclusions.

троэнергии ХХ в силовых трансформаторах по мере их старения по сравнению с паспортными данными, измеренными в год выпуска [2]. При этом конструкторы трансформаторов, как правило, утверждают, что потери ХХ в процессе эксплуатации в исправных трансформаторах, если и увеличиваются, то не более чем на 5% за весь срок службы трансформатора – 40 лет.

Измерения, проведённые нами, показали, что старение трансформатора приводит к росту потерь ХХ, порой весьма и весьма значительному, в зависимости от условий работы трансформатора и, особенно, качества его ремонтов в процессе эксплуатации.

Следует особо отметить, что в ОАО «Тольяттинский трансформатор» были рассмотрены данные измерений трансформаторов марки АОРЦТ, проработавших 18 лет на Волжской ГЭС. Оказалось, что произведённые ОАО «Тольяттинский трансформатор» силовые трансформаторы за период эксплуатации также увеличили потери ХХ на 5,65–6,25%. Эти трансформаторы были доставлены для ремонта. Магнитная система трансформаторов при этом никаким образом не подвергалась ремонту и находилась в целостности. Всё это позволяет предположить, что по тем или иным причинам за период эксплуатации трансформаторов потери ХХ неизбежно увеличиваются.

Цель настоящей статьи:

- определить структуру потерь ХХ в трансформаторах;
- рассмотреть современные представления о физических процессах, протекающих в электротехнической стали в условиях её эксплуатации;
- проанализировать факторы, влияющие на структурные составляющие потерь.

Для этого необходимо:

- подвергнуть ускоренному старению новую электротехническую сталь различных марок и измерить в ней удельные потери;
- «состаренные» образцы электротехнической стали подвергнуть отжигу и измерить удельные потери;
- измерить удельные потери в электротехнической стали трансформаторов с большим сроком службы до и после её отжига.

Структура потерь ХХ в силовых трансформаторах

Потери ХХ в трансформаторе состоят из (рис. 1)[3]:

- магнитных потерь;
- потерь в стальных элементах конструкции остова трансформатора;

- потерь в первичной обмотке от токов намагничивания ХХ;
- диэлектрических потерь в изоляции.

Потери в стальных элементах конструкции остова трансформатора, вызванные частичным ответвлением главного магнитного потока, относительно невелики и при расчёте потерь ХХ трансформатора учитываются в потерях в стали трансформаторов.

Диэлектрические потери в изоляции необходимо учитывать в трансформаторах, работающих при повышенной частоте. На частоте 50 Гц в силовых трансформаторах диэлектрические потери в изоляции незначительны и при расчёте потерь ХХ они так же, как и основные потери в первичной обмотке, составляющие обычно менее 1% потерь ХХ, не учитываются.

Таким образом, основную часть потерь ХХ в силовом трансформаторе составляют магнитные потери.

Факторы, влияющие на структурные составляющие потерь

В качестве основных причин увеличения потерь ХХ в силовых трансформаторах, определяемых сроком службы, являются:

- старение стали из-за нагрева магнитопровода вследствие потерь при перемагничивании сердечников и выделения тепла намагничивающими обмотками [4];
- механические воздействия на магнитопроводы в различных режимах работы (вибрация, электродинамические усилия при КЗ и т. д.) и при ремонтах трансформаторов [4];
- причины, связанные с износом материалов, в том числе:
 - общее нарушение межлистовой изоляции магнитопровода ввиду старения;
 - выгорание сердечника магнитопровода;
 - повреждение изоляции шпилек;



Рис. 1. Структура потерь ХХ в силовом трансформаторе

- местное нарушение межлистовой изоляции;
- ослабление прессовки магнитопровода (ввиду усадки стали магнитопровода);
- ослабление прессовки стыков;
- разрушение изолирующих прокладок в стыках и т.д. [5].

Исследования изменений потерь ХХ в трансформаторе, определяемых сроком его службы, длительные и к тому же не всегда имеется возможность вывести силовой трансформатор из работы. Результаты измерений на силовых трансформаторах одного и того же типа с одинаковыми номинальными данными, как правило, различаются из-за факторов «старения» трансформаторов, разброса параметров стали магнитопровода, неизбежных случайных отклонений на различных стадиях технологического процесса производства, неодинаковых условий эксплуатации и т.д. Для определения значений коэффициентов, отражающих изменение потерь ХХ в течение срока службы трансформатора, необходимо чётко представлять физику процессов и причины изменения потерь.

Физическая природа магнитных потерь в электротехнической стали

Электротехническая анизотропная сталь является магнитно-мягким материалом и отличается малой площадью петли гистерезиса. Основным параметром, определяющим площадь петли гистерезиса, является коэрцитивная сила H_c .

На H_c в основном влияют: внутренние напряжения и неметаллические включения.

Негативное влияние на H_c внутренних напряжений зависит от их амплитуды и значения магнитострикции λ_s . Наибольшее отрицательное влияние напряжений на H_c проявляется, согласно теории Кондорского, когда амплитуда внутренних напряжений $\Delta\sigma_i$ соизмерима с толщиной доменных границ δ .

На значение магнитных потерь в электротехнической анизотропной стали оказывают влияние различного рода несовершенства кристаллической решётки, примеси, находящиеся в α -твёрдом растворе Fe – 3% Si или в виде неметаллических включений, а также остаточные механические напряжения.

В настоящее время исследованы причины увеличения магнитных потерь в электротехнической анизотропной стали из-за наличия в ней неметаллических включений. Выявлено, что основная причина роста потерь на магнит-

ный гистерезис связана с искажениями доменной структуры. В частности, негативное воздействие оказывают примеси углерода и азота. В [6] приведены результаты исследований, которые показали, что неметаллические включения, размеры (не более 0,5 мкм) которых соизмеримы с толщиной доменных границ, приводят к резкому (в 1,3–2,0 раза) росту потерь на гистерезис, при этом практически не оказывая значимого влияния на изменение потерь на вихревые токи. Выделяющаяся фаза неметаллических включений (Fe_3C , Fe_2N , γ - Fe_4N) нарушает доменную структуру стали, приводит к многочисленным искривлениям и разрывам доменных границ вблизи мелкодисперсных включений.

Современные технологии и состав оборудования для производства стали позволяют исключить или снизить до минимума возможность загрязнения электротехнических сталей включениями углерод- и азотсодержащих фаз. Но всё же в кремнистых сталях промышленного производства имеются включения кислородсодержащих фаз: оксиды кремния и алюминия, а также нитриды титана, которые способствуют ухудшению потерь на магнитный гистерезис [6].

Экспериментальное исследование факторов, влияющих на магнитные свойства электротехнической стали

Согласно ГОСТ 21427.1-83 «Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая» коэффициент старения по удельным магнитным потерям не должен превышать для сталей марок 3311, 3411, 3412, 3413, 3414, 3415 – 4%; для сталей марок 3404, 3405, 3406, 3407, 3408, 3409 – 2%. Коэффициент старения определяется после нагрева в течение 120 ч при 120 – 150 °С в зависимости от типа стали.

С целью исследования влияния загрязнения электротехнических сталей включениями углерод- и азотсодержащих фаз на Верх-Исетском заводе – крупнейшем производителе трансформаторной стали в России, нами были проведены следующие эксперименты. Электротехническая холоднокатаная анизотропная сталь различных марок различных партий, абсолютно новая и готовая к поставке потребителю, была подвергнута ускоренному старению при $t = 225$ °С в течение 24 ч. Данные измерений удельных потерь занесены в протокол испытаний, после чего, старение повторили при тех же условиях. Затем эти образцы подвергли

Толщина листа, мм	Масса листа, г	Удельные потери p , Вт/кг, при $f=50$ Гц и магнитной индукции B , Тл, не более		Магнитная индукция B , Тл, при напряжённости магнитного поля, А/м, не менее			Вид обработки
		1,5/50	1,7/50	100	800	2500	
0,27	516,59	0,766	1,074	1,730	1,880	1,950	Начальные характеристики
		0,769	1,077	1,731	1,880	1,950	Ускоренное старение
		0,771	1,081	1,730	1,876	1,949	Ускоренное старение
		0,762	1,067	1,729	1,879	1,950	Отжиг
0,3	503,34	0,786	1,099	1,729	1,878	1,947	Начальные характеристики
		0,786	1,096	1,733	1,879	1,948	Ускоренное старение
		0,791	1,104	1,729	1,878	1,945	Ускоренное старение
		0,784	1,099	1,729	1,878	1,947	Отжиг
0,35	527,19	0,888	1,218	1,721	1,881	1,953	Начальные характеристики
		0,881	1,208	1,726	1,883	1,955	Ускоренное старение
		0,880	1,211	1,729	1,886	1,961	Ускоренное старение
		0,876	1,205	1,728	1,887	1,962	Отжиг

кратковременному отжигу в проходной печи при $t = 850^\circ$ в течение 3 мин (таблица).

На отдельных образцах коэффициент старения меньше 1%, однако разброс полученных удельных потерь на аппарате Эпштейна для многих образцов находится в пределах погрешности измерения.

Дальнейшие исследования в области изменения удельных магнитных потерь, связанные со старением стали, должны быть проведены при более длительном воздействии температуры. Кроме того, необходимо исследовать изменение магнитных свойств на образцах электротехнической стали со сроком службы.

Электротехнические стали на заключительных стадиях обработки в процессе их производства, а также в процессе обработки у потребителя (резки пластин, штамповки деталей магнитопроводов, навивке тороидальных магнитопроводов и т.п.) могут подвергаться деформациям. Деформации, превышающие предел упругости, приводят к остаточным механическим напряжениям.

Остаточные механические напряжения являются следствием остаточных деформаций (искажений) кристаллической решётки, возникающих в стали в результате внешних воздействий: механических, тепловых, электрических, магнитных. Магнитные свойства наиболее чувствительны к остаточным механиче-

ским напряжениям. Остаточные механические напряжения, приводящие к необратимым объёмным изменениям из-за пластических деформаций, сохраняются в стали после снятия нагрузки и способствуют ухудшению магнитных свойств [6].

Восстановление магнитных свойств электротехнических сталей в виде заготовок магнитопроводов после механической обработки возможно с помощью термической обработки. Эффект восстановления магнитных свойств (уменьшения удельных магнитных потерь $P_{1,5/50}$) составляет 9–16%. Однако термическую обработку заготовок магнитопроводов проводить у потребителя в ряде случаев нецелесообразно. Установлено, что с ростом габаритных размеров магнитопроводов силовых трансформаторов, усовершенствованием их конструкции улучшается технология резки пластин и сборки их в магнитопроводы, повышается культура производства. Минимальный уровень остаточных механических напряжений электротехнической стали необходимо обеспечить в состоянии поставки [6].

Практика завода-изготовителя ОАО «Тольятинский трансформатор» показывает, что приблизительно с 90-х годов прошлого века заготовки магнитопроводов не подвергаются термической обработке. В настоящее время увеличение потерь после сборки магнитопро-

вода не превышает 10% расчётных. На более ранних этапах производства, когда оборудование для обработки заготовок было не столь совершенным, приходилось подвергать сталь дополнительному отжигу.

Для выявления изменения удельных потерь в электротехнической стали были расшихтованы магнитопроводы четырёх трансформаторов марки ТМ 400, находившихся в эксплуатации примерно 30–35 лет. Образцы стали с каждого трансформатора были доставлены на Верх-Исетский завод. На аппарате Эпштейна измерены удельные потери до и после кратковременного отжига в проходной печи при $t = 850^\circ\text{C}$ в течение 3 мин. По результатам измерений видно, что после эксплуатации в стали удельные потери возросли на 23–27%. Принимая во внимание значение остаточных механических напряжений, можно сделать вывод о том, что в стали во время работы трансформатора возникли дополнительные внутренние напряжения, которые могут повлиять на изменения границ зёрен.

Для исследования изменения границ отдельных зёрен, пластины стали с тех же трансформаторов, были доставлены в химическую лабораторию МарГТУ г. Йошкар-Олы для снятия изоляционного покрытия. По согласованию с Верх-Исетским заводом изоляционное покрытие снималось в соляной кислоте при $t = 75^\circ\text{C}$. С помощью сканирующего зондового микроскопа ИНТЕГРА Прима при минимальном 100-кратном оптическом увеличении получены фотографии стали на границах зёрен до и после отжига. При детальном изучении снимков выявлено изменение границ зёрен. Это позволяет предположить, что в процессе эксплуатации сталь приобретает дополнительные механические напряжения, которые оказывают влияние на совершенство кристаллографической структуры, что приводит к изменению магнитных свойств электротехнической стали.

Для более точного анализа влияния полей механических напряжений использовались приборы, относящиеся к классу электромагнитных измерителей напряжений. В будущем планируется провести исследования влияния механических напряжений на магнитные свойства электротехнической стали.

Для выяснения причин увеличения потерь ХХ, связанных с износом материалов магнитопровода, необходимо исследовать трансформаторы с повышенными потерями ХХ. При разборке отдельных трансформаторов с повышенными потерями выявлены дефекты межлисто-

вой изоляции, которые могут оказывать значительное влияние на изменение удельных потерь электротехнической стали (рис. 2–4).

На рис. 2–4 видно общее нарушение межлистовой изоляции, которое на некоторых участках стали привело к выгоранию сердеч-



Рис. 2



Рис. 3



Рис. 4

ника. Оценить влияние износа материалов магнитопровода предстоит в дальнейшем.

Выводы

1. В течение срока службы силового трансформатора потери ХХ увеличиваются. Рост потерь ХХ в каждом трансформаторе может быть обусловлен условиями и режимами его работы, качеством сборки трансформатора и трансформаторной стали.

2. Внешние воздействия на магнитопровод трансформатора, такие как температура и механические воздействия в различных режимах работы (вибрация, электродинамические усилия при КЗ и т.д.) и при ремонтах трансформаторов, приводят к изменению магнитных свойств электротехнической стали.

3. Увеличение потерь ХХ в силовых трансформаторах происходит из-за изменения магнитных свойств электротехнической стали и за счёт износа материалов.

4. Причиной старения электротехнической стали является повышение температуры в трансформаторе в течение длительного времени, способствующее структурным изменениям в электротехнической стали, называемым процессами старения.

5. В процессе эксплуатации электротехническая сталь приобретает механические напряжения, которые оказывают влияние на совершенство кристаллографической структуры и способствуют ухудшению магнитных свойств.

6. Дальнейшие исследования в области изменения удельных магнитных потерь, связанных со старением стали, должны быть проведены при более длительном воздействии температуры.

7. Используя методы и средства измерения механических напряжений необходимо исследовать и оценить их влияние на изменение магнитных свойств электротехнической стали в условиях работы трансформатора.

Список литературы

1. Савинцев Ю.М., Карамутдинов Р.Н., Боков В.А. Энергоэффективные распределительные трансформаторы: проблемы и надежды // Электротехнический рынок. 2010. Вып. 3.

2. Алексеев Б.А., Воротицкий В.Э. Об уточнении нормативов и снижении потерь электроэнергии в силовых трансформаторах с учётом срока их службы // Доклады VI научно-технического семинара-выставки «Нормирование и снижение потерь электрической энергии в электрических сетях-2008». М.: Диа-логЭлектро, 2008.

3. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986.

4. Давыдов Г.И., Кобылин В.П. Метод снижения потерь холостого хода в силовых трансформаторах. Якутск: Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, 2008.

5. Основные виды повреждений трансформаторов. <http://forca.ru/spravka/transformatory/osnovnye-vidy-povrezhdeniy-transformatorov.html>.

6. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов. М.: Наука и технологии, 2004.

Цицорин Алексей Николаевич – аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий» Марийского ГТУ (МарГТУ). Окончил МарГТУ в 2006 г. по специальности «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства».

Журнал «Электротехника» переводится на английский язык и выходит в США в издательстве «ALLERTON PRESS, INC» в полном объёме. Российское авторское общество (РАО) выплачивает гонорар авторам статей, опубликованных в журнале.

Справки по тел.: (495) 697 33 35.

Стабилизация напряжения электрической сети высокого напряжения внутрисетевыми управляемыми источниками реактивной мощности индуктивно-ёмкостного типа

25 ноября 2010 г. состоялось совместное заседание Президиума Научно-технической коллегии некоммерческое партнёрство НП «НТС ЕЭС» и Научного совета РАН по проблемам надёжности и безопасности больших систем энергетики: «Стабилизация напряжения электрической сети высокого напряжения внутрисетевыми управляемыми источниками реактивной мощности индуктивно-ёмкостного типа».

На заседании со вступительным словом выступил председатель Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС», председатель научного Совета РАН по проблемам надёжности и безопасности больших систем энергетики, чл.-кор. РАН, доктор техн. наук, профессор А.Ф. Дьяков.

С докладом «Стабилизация напряжения электрической сети высокого напряжения внутрисетевыми управляемыми источниками реактивной мощности индуктивно-ёмкостного типа» выступил доктор техн. наук, профессор А.М. Брянцев (МЭИ (ТУ)). В докладе отмечено, что по данным «Концепции системы регулирования напряжения», утверждённой приказом ОАО «ФСК ЕЭС» № 62 от 14.03.2008, превышение отклонений напряжения от нормативных требований происходит более чем на 40% всех подстанций 110–220 кВ.

Исследования МЭИ (ТУ), ООО «Источники реактивной мощности», ООО «ЭСКО», проведённые более чем на 400 подстанциях электрических сетей РФ и СНГ, показали, что зачастую разброс напряжений $\pm 15\%$ имеет место в пределах одного класса напряжения в одно и то же время, и не хватает регулировочного диапазона мощности для поддержания напряжения в требуемых пределах. Подобная нестабильность напряжения сети — это не только ограничение пропускной способности, повышенные потери электроэнергии, ускоренный износ коммутационного оборудования, но и прямая угроза развития системных аварий.

Эффективным и хорошо известным способом стабилизации напряжения является применение управляемых индуктивно-ёмкостных устройств различных типов (устройств FACTS — Flexible AC Transmission Systems) — техно-

логии гибких (управляемых) электропередач переменного тока.

В мире налажено производство следующих типов индуктивно-ёмкостных устройств:

- нерегулируемые индуктивные (реакторы) и ёмкостные (батареи статических конденсаторов);
- дискретно регулируемые индуктивно-ёмкостные — группы реакторов и (или) батарей конденсаторов;
- плавно регулируемые индуктивно-ёмкостные (электромашинные, полупроводниковые, магнитно-полупроводниковые и др.).

Расчётные исследования эффективности применения регулируемых источников реактивной мощности на протяжённых транзитных электропередачах 330 и 500 кВ продемонстрировали их возможности в части повышения пропускной способности линии электропередачи, снижения потерь мощности и повышения пределов передаваемой мощности по условию статической устойчивости, сокращения времени протекания переходных процессов, уменьшения использования генераторов электростанций в качестве регулируемых источников реактивной мощности, исключения сложной системы коммутации неуправляемых шунтирующих реакторов на линиях.

В докладе отмечено, что отклонения напряжения, наблюдающиеся в приграничных частях сетей ПО и 220 кВ, невозможно нормализовать только управлением реактивной мощностью электростанций без использования локальных источников реактивной мощности. Однако в сетях высокого напряжения наблюдается дефицит этих устройств. Таким образом, следует признать, что существующие подходы регулирования напряжения сети высокого напряжения не полностью отвечают современным требованиям.

Одним из возможных путей выхода из сложившейся ситуации является совершенствование существующих средств и методов регулирования напряжения, причём компенсацию реактивной мощности необходимо осуществлять на всех уровнях напряжения как у потребителей, так и в электрических сетях. Только

экономических методов для реализации концепции управления напряжением и потоками реактивной мощности в электрических сетях недостаточно.

Усиление роли и приоритета управляемых индуктивно-ёмкостных устройств в схемах регулирования напряжения потребует экономически оправданных дополнительных капиталовложений. Как показывает практика, в сетях ряда ОАО «Холдинг межрегиональные сетевые компании» («МРСК»), ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «Казахстанская компания по управлению электрическими сетями» («КЕГОС») и других достигается:

- автоматическая стабилизация напряжения сети 110 – 500 кВ по заданной уставке в нормальных, ремонтных и послеаварийных режимах;

- исключение коммутационного оборудования из процесса регулирования напряжения в нормальных режимах;

- повышение пропускной способности существующей сети;

- снижение удельных потерь до 20–30%;

- снижение ущерба, наносимого субъектам рынка электроэнергии, от действий противоаварийной автоматики или недопустимого снижения качества электроэнергии.

В отдельных случаях срок окупаемости (с учётом повышения эффективности технологических процессов подключённого к электрической сети потребителя) составил менее одного года.

В докладе сделаны следующие выводы

1. В сети высокого напряжения РФ наблюдается массовое отклонение рабочих значений напряжений за пределы, превышающие требования ГОСТ ($\pm 15\%$). Даже в нормальных режимах отклонения напряжений близки к предельно допустимым для электросетевого и присоединённого оборудования, что является прямой предпосылкой возникновения технологических нарушений.

2. Колебания напряжения сопровождаются увеличенными перетоками реактивной мощности в электрической сети, приводящими к увеличению потерь до 1,5 раз.

3. Проблема решается дооснащением электрической сети до технически целесообразного уровня управляемыми источниками индуктивно-ёмкостного типа, широко производящимися как в РФ, так и за рубежом.

4. Хронический, нарастающий год от года дефицит управляемых устройств индуктивно-ёмкостного типа связан с отставанием тех-

нической политики электроэнергетических компаний от законодательных реформ отрасли в части самодостаточности хозяйствующих субъектов (генерация, транзит, потребитель) по обеспечению собственных технологических процессов.

5. Отсутствуют эффективные механизмы широкомасштабного оснащения электрической сети управляемыми устройствами индуктивно-ёмкостного типа, позволяющие ликвидировать тенденцию хронического нарастания их дефицита.

С заключениями от экспертных организаций выступили от Института электроэнергетики МЭИ (ТУ) – заместитель заведующего кафедрой РЭиА доктор техн. наук, профессор Б.К. Максимов, от ОАО «СО ЕЭС» – начальник Департамента технического регулирования ОАО «СО ЕЭС», доктор техн. наук Ю.Н. Кучеров, от ОАО «НТЦ Электроэнергетики» – научный руководитель доктор техн. наук, профессор Ю.Г. Шакарян, от филиала ОАО «ФСК ЕЭС» МЭС Центра – доктор техн. наук В.Н. Рябченко.

В дискуссии выступили доктор техн. наук, профессор С.В. Смолвик (ООО «Источники реактивной мощности»), доктор техн. наук В.А. Баринов (заведующий отделом ОАО «ЭНИН»), инж. Ф.А. Грибков (ОАО «НК «Роснефть»).

В докладах экспертов и в выступлениях по представленной работе высказан ряд замечаний и предложений.

1. В настоящее время одним из ключевых направлений развития электроэнергетики является создание интеллектуальных электроэнергетических систем (ИЭЭС). ИЭЭС – это энергосистема, оснащённая адаптивной автоматической системой оптимального управления процессами генерации, передачи, распределения и потребления электроэнергии, которая функционирует в темпе протекания технологического процесса. При этом под интеллектуальностью следует понимать способность к самоорганизации и самонастройке энергосистемы в соответствии с заранее определёнными критериями оптимальности функционирования без активного участия человека в процессе эксплуатации в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах.

В последнее время тема «интеллектуальных сетей» (Smart Grid) часто обсуждается на международных и российских форумах и конференциях. Интеллектуальные сети должны включать комплекс технических средств, по-

звolyающих обеспечить высокие надёжность электроснабжения и качество электроэнергии. Интеллектуальная сеть должна на новом техническом и технологическом уровнях объединить потребителей и производителей электроэнергии в единую автоматизированную систему. Она позволит в реальном времени отслеживать и контролировать режимы работы всех участников процесса выработки, передачи и потребления электроэнергии, оперативно реагировать на изменения различных параметров в энергосистеме и осуществлять электроснабжение с максимальной надёжностью и экономической эффективностью. Благодаря внедрению современных технологий интеллектуальная электрическая сеть сможет в зависимости от ситуации изменять свои характеристики, увеличивая пропускную способность и регулируя качество поставляемой электроэнергии.

Отмечено, что создание ЕЭС России всегда сопровождалось решением проблем управления надёжностью и экономичностью. Основная база нормативных документов для обеспечения надёжности и экономичности работы ЕЭС СССР была разработана ещё в середине 80-х годов прошлого столетия. Достигнутый уровень информационных технологий является основой для дальнейшего решения задач по созданию ИЭЭС.

В США и странах Европы потребность в «интеллектуальных сетях» связана с политикой использования возобновляемых источников энергии и развитием рассредоточенных по территории источников генерации. В этом понимании интеллектуальная электросеть — это распределительная электрическая сеть, оснащённая программно-аппаратными устройствами с целью обеспечения согласованного процесса производства, передачи и потребления электроэнергии на муниципальном уровне в условиях масштабного ввода нетрадиционных источников энергии и развития распределённых источников генерации с переменным режимом генерации.

2. Создание ИЭЭС в России является приоритетной задачей. И для её решения необходима концентрация усилий и координация работы всех участников процесса электроснабжения — от выработки электроэнергии до её потребления. В настоящее время в ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «СО ЕЭС», ОАО «Институт «Энергосетьпроект» и ОАО «НТЦ электроэнергетики» проводятся работы по оснащению Единых национальных (общероссийских) электрических сетей (ЕНЭС) устройствами ре-

гулирования реактивной мощности. Для разработки программы оснащения электрических сетей различными источниками регулирования целесообразно объединить усилия всех заинтересованных организаций.

Проблема обеспечения надёжности и экономичности должна стать основной задачей государственной политики. Однако в настоящее время отсутствует генеральный проектировщик ИЭЭС.

Координировать такую важную работу должна Российская академия наук, которая объединит все научно-исследовательские институты и центры, проектно-испытательские институты и высшие учебные заведения для совместной работы по этой проблеме.

3. Проблема оснащения электрических сетей источниками реактивной мощности продолжает оставаться актуальной. Управление реактивной мощностью имеет важное значение для повышения надёжности электроснабжения, сохранения устойчивости работы энергосистем, управления напряжением и передаваемой мощностью в электрических сетях. В зависимости от назначения и областей применения к этим источникам предъявляются различные требования. Так, для магистральных и системообразующих сетей наиболее важное требование — это обеспечение статической и динамической устойчивости электропередачи; для распределительных сетей на первое место выходят требования по поддержанию уровней напряжения, минимизация потерь электроэнергии и других показателей качества электроэнергии. В общем случае от источников реактивной мощности требуется обеспечение заданных пределов пропускной способности сети в нормальных и послеаварийных режимах, условий включения линий, защиты от внутренних перенапряжений, обеспечение регулирования напряжения. Одним из эффективных средств регулирования реактивной мощности являются асинхронизированные генераторы. В последние годы во всём мире, в том числе и в России, активно внедряются новые эффективные устройства регулирования реактивной мощности, основанные на использовании современной силовой электроники, а также устройства, позволяющие обеспечить так называемое векторное регулирование в энергосистемах, которое, наряду со стабилизацией напряжения, позволяет существенно повысить пределы передаваемой мощности. Освоено производство различных типов подстанционных средств компенсации реактивной

мощности (СКРМ), которые открывают новые пути решения проблемы регулирования напряжения и реактивной мощности. Одним из способов, позволяющих осуществлять эффективную компенсацию мощных возмущений и стабилизацию режимов энергосистемы, является технология FACTS (Flexible AC Transmission Systems) – технология гибких (управляемых) электропередач переменного тока.

4. Авторами доклада под руководством профессора А.М. Брянцева проделана большая работа по созданию устройства регулирования реактивной мощности в сетях высокого напряжения потребителей. Разработанное устройство – система стабилизации высокого напряжения на базе управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов (УШР) и коммутируемых батарей статических конденсаторов (БСК) – позволяет эффективно решать задачи гибкого управления электроэнергетическим режимом по напряжению и реактивной мощности и стабилизации напряжения на энергетическом объекте и в прилегающей электрической сети. Разработанное устройство представляет собой один из элементов технологии FACTS, применение которого при наличии технико-экономических обоснований может рассматриваться в электроэнергетических системах наряду с другими известными устройствами, решающими аналогичные задачи.

Примеры успешного функционирования предложенных устройств иллюстрируют эффективность их применения в распределительной электрической сети Тюменской энергосистемы, обладающей такими особенностями, как неравномерность суточного графика нагрузки, вызывающая потребность в стабилизации напряжения, и высокая нагрузка трансформаторного оборудования питающих подстанций перетоком реактивной мощности, обусловившая потребность в компенсации реактивной мощности.

Вместе с тем, материалы, обосновывающие принятые решения по системе управления предлагаемым комплексом источников реактивной мощности, в докладе не представлены.

Внедрение представленных в докладе устройств является частичным решением комплексной проблемы защиты от перенапряжений, снижения потерь; обеспечения качества электроэнергии. Для полного решения проблемы компенсации реактивной мощности в сетях 220–750 кВ предложенных авторами устройств недостаточно, а сделанные предложе-

ния должны быть уточнены для других энергосистем.

Принятие решения о типе и технических характеристиках устанавливаемых устройств компенсации реактивной мощности должно производиться на основании технико-экономического обоснования, базирующегося на результатах исследования текущих и перспективных электроэнергетических режимов, с учётом актуальных решаемых задач управления электроэнергетическими режимами. Требуется проведение глубоких исследований для определения на основе технико-экономического анализа наиболее рациональных типов устройств регулирования реактивной мощности и их необходимого количества для электрических сетей различного назначения: магистральных, системообразующих и распределительных.

5. В экспертных заключениях по докладу представлены следующие основные замечания:

– необоснованное использование применительно к шинам электросетевых объектов высокого и сверхвысокого напряжения таких терминов как: «стабилизация напряжения» (в отличие от термина «регулирование напряжения»), «внутрисетевые», «внешнесетевые» управляемые источники реактивной мощности;

– рассмотрены только источники реактивной мощности (ИРМ) индуктивно-ёмкостного типа и не рассматриваются другие типы устройств, например, на базе асинхронизированных синхронных компенсаторов (АСК) и статических компенсаторов (СТАТКОМ);

– анализ отклонений напряжений для разных уровней номинальных напряжений и выводы необходимо приводить отдельно по сетям 110–220 кВ, 330 и 500–750 кВ в соответствии с ГОСТ 1516.3-96;

– в анализе положения с регулированием реактивной мощности в сетях высокого напряжения (ВН) и сверхвысокого напряжения (СВН) не учтены принятые нормативно-технические документы, такие как ГОСТ 1516.3-96, Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем СО 153-34.20.118-2003, Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем СТО 59012820.29.240.007-2008, Правила технологического присоединения, утвержденные постановлением Правительства РФ № 861 от 27.12.2004 г. и др.; в настоящее время ОАО «Институт «Энергосетпроект» провёл работы по оснащению электрических сетей ЕНЭС

устройствами FACTS на период до 2015 г. С учётом этого говорить о соответствии или несоответствии зарубежным условиям концепции регулирования напряжения, принятой ОАО «ФСК ЕЭС», некорректно без сопоставительного анализа этих документов; в докладе не указано, какие конкретно положения концепции не отвечают современным условиям и в чем, собственно, заключаются современные условия;

– авторы доклада считают, что для реализации принятой концепции регулирования напряжения экономических методов недостаточно, однако ими не представлены возможные пути выхода из сложившейся ситуации;

– в настоящее время практически все вопросы, связанные с электросетевым строительством в ЕНЭС, находятся в сфере ответственности ОАО «ФСК ЕЭС», а также согласовываются с ОАО «СО ЕЭС», которые являются государственными компаниями и осуществляют свою деятельность под непосредственным руководством Минэнерго России, в связи с этим предложенное в докладе усиление роли государства требует обоснования;

– влияние плавно регулируемых средств компенсации реактивной мощности на параметры качества электроэнергии неоднозначно, поэтому необходимо оценивать, как и на какие именно показатели качества электроэнергии влияют предложенные устройства.

С заключительным словом и по проекту решения выступил Председатель Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС», Председатель научного Совета РАН по проблемам надёжности и безопасности больших систем энергетики А.Ф. Дьяков.

На основании материалов основного доклада, выступления представителей экспертных организаций, замечаний и предложений членов Советов и приглашённых специалистов, выступивших в дискуссии, на совместном заседании принято решение:

1. Совершенствование системы управления надёжностью, экономичностью и экологичностью функционирования ЕЭС России на основе создания интеллектуальных электроэнергетических систем должно стать важной задачей государственной политики. Координировать работу по созданию интеллектуальных электроэнергетических систем должна Российская академия наук, которая может объединить все научно-исследовательские институты и центры, проектно-изыскательские институты и

высшие учебные заведения для совместной работы по этой проблеме.

2. Необходимо совершенствовать концепцию комплексного управления напряжением и потоками реактивной мощности в электрических сетях для всех уровней напряжения с учётом рыночных отношений в электроэнергетике РФ. При совершенствовании концепции необходимо руководствоваться тем, что для магистральных и системообразующих сетей наиболее важное требование – обеспечение статической и динамической устойчивости энергетических объединений; для распределительных сетей первостепенными являются требования по поддержанию заданных уровней напряжения и снижение потерь электроэнергии. При этом обеспечение заданных показателей качества электроэнергии является актуальным для всех уровней напряжения.

3. Отметить положительный опыт и возможность использования представленных в докладе устройств стабилизации напряжения на базе управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов (УШР) и коммутируемых батарей статических конденсаторов (БСК). Рекомендовать авторам доклада учесть критические замечания и предложения, изложенные в экспертных заключениях, а также замечания и предложения членов Президиума Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС» и Научного Совета РАН по проблемам надёжности и безопасности больших систем энергетики и приглашённых специалистов.

4. Рекомендовать Минэнерго России ускорить работу по совершенствованию нормативной базы комплексного внедрения современных средств компенсации реактивной мощности для электрических сетей всех уровней напряжения с учётом рыночных отношений.

5. Для повышения эффективности регулирования напряжения и реактивной мощности рекомендовать ОАО «СО ЕЭС» совместно с ОАО «ФСК ЕЭС» и ОАО «Холдинг МРСК» проработать возможность расширения состава системных услуг по регулированию напряжения и реактивной мощности в электрических сетях с вовлечением в этот процесс участников производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

6. Рекомендовать вузам электроэнергетического профиля возобновить на новом уровне подготовку специалистов по направлению «кибернетика электроэнергетических систем», прерванную в 90-е годы прошлого столетия.

Юрий Урунбекович Мавлянбеков

(1936–2011)

31 января 2011 г. после тяжёлой и продолжительной болезни скончался заместитель начальника научно-технического центра «Научно-техническое сопровождение работ (услуг)» (НТЦ НТСП) ФГУП ВЭИ им. В.И. Ленина, член редколлегии журнала «Электротехника» Юрий Урунбекович Мавлянбеков.

Окончив МВТУ им. Баумана в 1959 г. по специальности «силовой синхронно-следящий электропривод» Юрий Урунбекович начал трудовую деятельность в г. Красноярск в п/я 32 в должности испытателя. Был начальником испытательной станции, старшим мастером, заместителем начальника цеха.

С 1962 г. он работал во Фрунзенском филиале ВНИИЭМ. За 10 лет прошёл путь от руководителя группы до директора. Под его руководством и при его непосредственном участии была проведена разработка электрических машин малой мощности, изготовление которых было осуществлено на ряде заводов страны, создано оборудование и освоено производство изоляционных трубок на Майли-Сайском



заводе «Изолит», разработано специальное технологическое оборудование для производства электрических машин.

В 1972–1990 гг. Ю.У. Мавлянбеков работал в Министерстве электротехнической промышленности СССР начальником технического отдела, главным инженером ВПО, главным инженером Главэлектромаша, первым заместителем начальника технического управления. Его работа была связана с реализацией крупных комплексных проектов: создание и освоение единых се-

рий асинхронных двигателей 4А, 4АМ, АИ, организация массового производства сложных бытовых изделий

В 1978 г. Ю.У. Мавлянбеков защитил кандидатскую диссертацию в Новочеркасском политехническом институте.

В 1991 г. Юрий Урунбекович стал исполнительным директором научно-технической ассоциации «Прогрессэлектро», а в 2003 г. перешёл на работу в ФГУП ВЭИ им. В.И. Ленина на должность начальника отдела общепромышленных проблем электротехники и был назначен заместителем начальника НТЦ «Научно-технического сопровождения работ (услуг)».

Ю.У. Мавлянбеков – член редакционной коллегии журнала «Электротехника» с 1995 г.

За заслуги в развитии электротехнической промышленности Ю.У. Мавлянбеков награждён двумя орденами «Знак Почёта», медалями.

Юрия Урунбековича отличали широта взглядов, демократичность, уважительное отношение к людям. Хорошая память о Юрии Урунбековиче сохранится у всех, кто знал его.

*Редакция и редколлегия журнала
«Электротехника»*

Валентин Алексеевич Прозоров

(1929–2011)

30 января 2011 г. на 82-м году ушёл из жизни заслуженный машиностроитель Российской Федерации, Почётный академик Академии электротехнических наук РФ, доктор технических наук Валентин Алексеевич Прозоров.

Валентин Алексеевич родился 24 ноября 1929 г. в Саратове. В 1948 г. поступил в Московский энергетический институт, который окончил в 1954 г. Из 56 лет его трудовой деятельности, посвящённых бессменному служению электротехнике и электромеханике, почти 40 отданы Всероссийскому научно-исследовательскому проектно-конструкторскому и технологическому институту малых электрических машин (ВНИИМЭМ), где под его руководством и при его непосредственном участии велись очень интересные и нужные стране исследования и разработки уникальных типов электрических машин, используемых в авиационной, ракетно-космической технике и системах про-



мышленной автоматики, медицинской и бытовой технике. Здесь в 1987 г. он успешно защитил диссертацию на звание доктора технических наук. До последнего дня своей жизни Валентин Алексеевич продолжал творчески трудиться, руководя одним из подразделений института, занимающимся вопросами управления научно-технической документации и стандартизации,

поддержанием в рабочем состоянии системы менеджмента качества. Обладая глубокими теоретическими знаниями и большим практическим опытом, Валентин Алексеевич не ограничивался только работой в институте, занимаясь активной научно-общественной деятельностью, являясь членом различных научных Советов ведущих технических вузов Санкт-Петербурга, занимая пост председателя Государственных аттестационных комиссий.

За вклад в развитие электротехники Валентин Алексеевич награждён орденом Трудового Красного Знамени, нагрудным знаком «За заслуги в стандартизации». Указом Президента РФ ему присвоено звание «Заслуженный машиностроитель РФ».

Светлый образ Валентина Алексеевича Прозорова, посвятившего свою жизнь отечественной науке, принципиально-честного и отзывчивого человека надолго сохранится в памяти коллег, сослуживцев и всех, кто его знал.

**Требования к содержанию и оформлению статей
журнала «Электротехника»**

I. Содержание.

1. Введение. Состояние вопроса, рассматриваемого в статье. Постановка задачи, её новизна и актуальность.

2. Основное содержание. Последовательное изложение существа рассматриваемого вопроса или решаемой задачи. При изложении избегать громоздких аналитических выражений, формул, расчётов и др. Основные аналитические соотношения представлять в обобщённой форме с указанием методов их решения. Оригинальные методы решения могут быть пояснены более подробно. Изложение желательно иллюстрировать соответствующими рисунками, схемами, диаграммами и др., максимально отражающими существо рассматриваемых вопросов.

3. Моделирование и экспериментальная часть (если они есть). Краткое описание математической или физической моделей. Оценка полученных результатов при моделировании.

4. Заключение. Выводы и значимость результатов для соответствующих областей науки и техники.

5. Список литературы. Приводится в конце статьи в порядке последовательности ссылок в тексте. Указываются:

– для журнальных статей – фамилия и инициалы авторов, наименование статьи или сборника, год издания, номер;

– для книг – фамилия и инициалы авторов, название книги, наименование издательства, город его нахождения, год издания.

В список литературы не должны включаться не напечатанные материалы и материалы для служебного пользования.

6. К статье должны быть приложены аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, а также название статьи на английском языке.

II. Оформление.

1. Объём статьи не должен превышать 12 страниц текста, набранного на компьютере через 2 интервала с полями 2–3 см и иметь не более 5–6 рисунков, сделанных с помощью компьютера (Word, Photoshop). Формулы должны быть набраны на компьютере в отдельные строки.

2. Статья должна сопровождаться письмом автора или организации, где она выполнена. К статье должны быть приложены сведения об авторах: фамилии, имена и отчества авторов, место работы, должности, учёные звания, степени, а также название вуза и факультета с указанием года его окончания. Необходимо указать контактные телефоны и электронные адреса.

3. Статья представляется в электронной форме по электронному адресу: elektrotechnika@mtu-net.ru. или по почте с приложением CD-диска с текстом и рисунками.

В соответствии с решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал «Электротехника» включен в перечень ведущих научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.