



*С НОВЫМ ГОДОМ!*

---



ТАВРИДА ЭЛЕКТРИК

Поздравляем  
с Новыми годами и Рождеством!

Желаем успехов и процветания.

Пусть в 2006 году Вам откроется  
мир надежности  
и стабильности!

РК ТАВРИДА ЭЛЕКТРИК  
Центральный офис: 123 298, МОСКВА, а/я 15.  
Тел.: (095) 787 25 25. Факс: (095) 943 12 95.  
E-mail: [rosim@tavrida.ru](mailto:rosim@tavrida.ru).

[www.tavrida.ru](http://www.tavrida.ru)

**РОССИЯ**

ВОЛГОГРАД	Тел./факс: (8442) 93 08 68	<a href="mailto:info@volga.tavrida.ru">info@volga.tavrida.ru</a>
ГУБКИН	Тел./факс: (07241) 4 57 39	<a href="mailto:info@kma.tavrida.ru">info@kma.tavrida.ru</a>
ЕКАТЕРИНБУРГ	Тел./факс: (343) 260 54 85	<a href="mailto:mail@ural.tavrida.ru">mail@ural.tavrida.ru</a>
ИРКУТСК	Тел./факс: (3952) 53 67 65	<a href="mailto:info@irkut.tavrida.ru">info@irkut.tavrida.ru</a>
КАЗАНЬ	Тел./факс: (843) 299 41 23	<a href="mailto:info@tkt.tavrida.ru">info@tkt.tavrida.ru</a>
КРАСНОЯРСК	Тел./факс: (3912) 27 20 51	<a href="mailto:info@krnt.tavrida.ru">info@krnt.tavrida.ru</a>
ЛИПЕЦК	Тел./факс: (0742) 36 71 28	<a href="mailto:info@lipetsk.tavrida.ru">info@lipetsk.tavrida.ru</a>
МОСКВА - ВОСТОК	Тел./факс: (095) 540 80 43	<a href="mailto:info@mv.tavrida.ru">info@mv.tavrida.ru</a>
МОСКВА - ЦЕНТР	Тел./факс: (095) 261 83 09	<a href="mailto:info@msk.tavrida.ru">info@msk.tavrida.ru</a>
МОСКВА - ЗАПАД	Тел./факс: (095) 540 80 43	<a href="mailto:info@zapad.tavrida.ru">info@zapad.tavrida.ru</a>
Н. НОВГОРОД	Тел./факс: (8312) 51 14 87	<a href="mailto:info@nnov.tavrida.ru">info@nnov.tavrida.ru</a>
НОВОСИБИРСК	Тел./факс: (383) 346 62 18	<a href="mailto:info@nsb.tavrida.ru">info@nsb.tavrida.ru</a>
ОМСК	Тел./факс: (3812) 23 64 82	<a href="mailto:info@omsk.tavrida.ru">info@omsk.tavrida.ru</a>

**ПЕРМЬ**

РОСТОВ-НА-ДОНЕ	Тел./факс: (342) 249 71 55	<a href="mailto:info@perm.tavrida.ru">info@perm.tavrida.ru</a>
САМАРА	Тел./факс: (863) 236 00 83	<a href="mailto:info@don.tavrida.ru">info@don.tavrida.ru</a>
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ	Тел./факс: (846) 262 30 30	<a href="mailto:info@samara.tavrida.ru">info@samara.tavrida.ru</a>
СУРГУТ	Тел./факс: (812) 373 23 61	<a href="mailto:info@spb.tavrida.ru">info@spb.tavrida.ru</a>
УФА	Тел./факс: (3462) 51 53 94	<a href="mailto:info@surgut.tavrida.ru">info@surgut.tavrida.ru</a>
ХАБАРОВСК	Тел./факс: (3472) 32 57 81	<a href="mailto:info@ufa.tavrida.ru">info@ufa.tavrida.ru</a>
ЧЕРЕПОВЕЦ	Тел./факс: (4212) 38 19 68	<a href="mailto:info@dv.tavrida.ru">info@dv.tavrida.ru</a>
ЧЕРНОЗЕМЬЕ	Тел./факс: (8202) 59 72 65	<a href="mailto:info@vgda.tavrida.ru">info@vgda.tavrida.ru</a>
ЧЕЛЯБИНСК	Тел./факс: (0742) 40 83 74	<a href="mailto:info@chzn.tavrida.ru">info@chzn.tavrida.ru</a>
БЕЛОРУССИЯ	Тел./факс: (351) 796 63 91	<a href="mailto:tavrida@telsat.ru">tavrida@telsat.ru</a>
МИНСК	Тел.: +375(17) 241 76 12	<a href="mailto:info@minsk.tavrida.ru">info@minsk.tavrida.ru</a>
КАЗАХСТАН	Тел.: +7(3172) 32 31 90	<a href="mailto:info@kz.tavrida.ru">info@kz.tavrida.ru</a>
АСТАНА		



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

МЕДАЛЬ  
“ЗА ЗАСЛУГИ В  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ”



## УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ МИНПРОМа РФ (г. МОСКВА)

АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ» (г. САРАНСК)

АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)

АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)

АО «ВЭЛНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)

АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)

АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)

НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)

АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

## СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

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

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

Подписаться на журнал можно в почтовых отделениях связи по объединённому каталогу Департамента почтовой связи. Подписной индекс — 71111.

В редакции можно подписаться на журнал с любого месяца и приобрести отдельные номера за прошлые и нынешний годы.

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

При перепечатке ссылка на журнал «Электротехника» обязательна.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несёт.

Рукописи статей не возвращаются.

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

**Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: (495) 361-95-96**  
**E-mail [elektrotehnika@mtu-net.ru](mailto:elektrotehnika@mtu-net.ru)**

Редактор отдела О.В. Кунавина.

Научный редактор Л.А. Романова.

Редактор З.П. Фёдорова

Сдано в набор 27.09.2005. Подписано в печать 10.11.2005. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 122.

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный № 01330.

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

© «Электротехника», 2005 г.

# № 12 ДЕКАБРЬ 2005

## СОДЕРЖАНИЕ

### ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ТЕХНИКА

Белкин Г.С. Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов, обладающих "интеллектом") для коммутации цепей высокого напряжения ..... 3

Ивакин В.Н. Внешние характеристики устройств гибких передач переменного тока и их влияние на характеристики мощности управляемых линий электропередачи переменного тока ..... 10

Волкова О.В., Годулян В.В., Корявин А.Р., Остапенко Е.И., Трифонов В.З. Электрическая прочность линейных полимерных изоляторов для линий электропередач высокого и сверхвысокого напряжения ..... 19

Грачёв П.Ю., Костырев М.Л., Мягков Ф.Н., Кунцевич П.А. Многообмоточные преобразователи энергии для автономных объектов ..... 24

Литовкин Г.И., Орлов А.И., Третьяков А.Н. Средства улучшения качества электрической энергии на сельскохозяйственных предприятиях ..... 29

Дизендорф Э.А. Мостовой инвертор с переключающими нелинейными дросселями и одним полупроводниковым ключом ..... 33

Михеев Г.М., Федоров Ю.А., Михеев Г.М. Оперативная диагностика контактора быстродействующего регулятора силового трансформатора ..... 41

Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Швец И.С. О повышении удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов ..... 47

### ЭЛЕКТРОПРИВОД

Кузнецов Ю.П., Бирюков А.В., Карпова Г.В., Прокофьева Л.А., Лиморенко П.М., Никифоров Е.А., Придатков А.Г., Тескин Б.А., Рябинин Б.В., Тарасов С.В. Модернизированная система управления электрооборудованием перегрузочной машины ПМ-230 реактора ВВЭР-440 Кольской АЭС ..... 51

### ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Зекцер Д.М. О замене низковольтных электротехнических аппаратов ..... 56

Памяти Юрия Алексеевича Сабинина ..... 58

Памяти Михаила Константиновича Захарова ..... 59

Памяти Сакае Ямамура ..... 60

Перечень статей, опубликованных в журнале "Электротехника" в 2005 г. ..... 61

### НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Александр Борисович Кувалдин ..... 65

## CONTENTS

### HIGH-VOLTAGE ENGINEERING

Belkin G.S. The application of self-controlled apparatus ("intelligent" apparatus) for switching operations in high voltage network ..... 3

Ivakin V.N. The external characteristics of devices FACTS and their influence on the characteristics of capacity of controlled transmission lines of an alternating current ..... 10

Volkova O.V., Goglyan V.V., Ostapenko E.I., Trifonov V.Z. Electrical strength polimer insulators for HV and EHV transmission line ..... 19

Grachev P.Yu., Kostyrev M.L., Myagkov F.N., Kuntcevich P.A. Multiwinding power converters for autonomous energy supply systems ..... 24

Litovkin G.I., Orlov A.I., Tretiaykov A.N. Means of quality improvement of electric power at agricultural enterprises ..... 29

Dizendorf E.A. The bridge inverter with nonlinear switching and one semiconductor power switch ..... 33

Mikheev G.M., Fyodorov Yu.A., Mikheev G.M. On-line diagnostics of the contactor of the quick-acting regulator of a power transformer ..... 41

Grebennikov I.Yu., Gynko V.I., Dmitrishin A.Ya., Onicshenko L.I., Shvets I.S. About increase of the specific power characteristics and resource of high-voltage pulse condensers ..... 47

### THE ELECTRIC DRIVE

Kuznetsov Yu.P., Biryukov A.V., Prokofyeva L.A., Limorenko P.M., Nikiforov E.A., Pridatkov A.G., Teskin B.A., Ryabinin B.V., Tarasov S.V. The modernized control system electric equipment PM-230 of the "ВВЭР-440" reactor Kolskoy APS ..... 51

### FROM THE OPERATIONAL EXPERIENCE

Zektser D.M. About replacement of low-voltage electrotechnical devices ..... 56

Memories Yuriy Alekseevich Sabinin ..... 58

Memories Michaila Konstantinovicha Zakcharova ..... 59

Memories Sakae Yamamura ..... 60

The list of the articles that were published in journal "Electrotechnics" in 2005 ..... 61

### OUR YUBILYARY

Aleksandr Borisovich Kuvaldin ..... 65

## Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов, обладающих "интеллектом") для коммутации цепей высокого напряжения

БЕЛКИН Г.С.

Рассмотрены области применения самоуправляемых коммутационных аппаратов. Определены задачи, которые могут быть решены с помощью самоуправляемых аппаратов высокого напряжения. Проанализированы технические требования, которым должны удовлетворять все элементы таких аппаратов.

*The work deal with application regions of self-controlled switching apparatus. There were picked out the problems? Which may be solved with help of self-controlled apparatus in high voltage network. The requirements for self-controlled apparatus elements were analyzed in the work.*

В последние годы появляется все больше самоуправляемых или, как их называют, умных коммутационных аппаратов (аппаратов, обладающих признаками "интеллекта"). Они оснащены устройствами, которые позволяют осуществлять управляемую коммутацию, а также проводить мониторинг и диагностику жизненно важных узлов аппарата. Преимущества выключателей с управляемой коммутацией (позволяющих обеспечить уменьшение бросков тока и коммутационных перенапряжений, увеличение ресурса и других параметров) известны давно. Увеличение числа таких выключателей в эксплуатации связано с тем, что в последние годы были созданы малоэнергоёмкие приводы выключателей с достаточно стабильными характеристиками, а также более совершенные системы управления. По данным СИГРЭ в мире за период с 1984 по 2001 гг. было установлено 2500 выключателей с управляемой коммутацией. Из них 64% предназначены для коммутации конденсаторных батарей, 17% – для коммутации шунтирующих реакторов, 17% – для включения трансформаторов и 2% – для включения линий электропередач без больших бросков тока и перенапряжений. Исследуется также эффективность применения выключателей с управляемой коммутацией в других цепях, возможность повышения номинальных параметров выключателя с помощью управляемой коммутации.

Системы диагностики дают возможность

на ранней стадии реагировать на изменение изоляционных, коммутационных и других характеристик аппаратов, своевременно обнаруживать опасные отклонения этих характеристик от номинальных и тем самым, с одной стороны, предотвратить ненужные ревизии аппарата, а с другой стороны, избежать крупных аварий. Кроме того, такие системы позволяют более точно оценить остаточный срок службы оборудования. В настоящее время, по данным СИГРЭ большая часть трансформаторов (58% установленных), выключателей (42%) и КРУЭ (30%) оборудованы датчиками для диагностики их состояния.

Применение самоуправляемых электрических аппаратов дает возможность решать различные задачи, осуществлять оптимальную предсказуемую эксплуатацию оборудования.

### Задачи, решаемые с помощью самоуправляемых электрических аппаратов

В настоящее время популярна концепция совмещения функций защиты и управления. По данным опроса, проведенного СИГРЭ, 68% потребителей и 78% изготовителей подстанционного оборудования высказались за то, чтобы объединенные функции защиты и управления выполняло "умное" электронное устройство (IED), которым индивидуально оснащалось бы высоковольтное оборудование подстанции [1]. Применение выключателей с управляемой коммутацией можно считать шагом в этом направлении. Управляемая ком-

мутация решает проблему предотвращения опасных бросков тока и перенапряжений, увеличения ресурса оборудования. При управляемой коммутации учитывается не только фаза напряжения при включении и фаза тока при отключении, но и остаточный магнитный поток при включении холостого трансформатора, остаточное напряжение на коммутируемой конденсаторной батарее, время восстановления электрической прочности дугогасительных промежутков выключателя и др.

Важной задачей, которая решается с помощью самоуправляемых аппаратов, является повышение надёжности оборудования. Повышению надёжности способствует применение как управляемой коммутации, так и систем мониторинга и диагностики. Самоуправляемое высоковольтное оборудование может служить основой для создания управляемой с помощью компьютера подстанции, имеющей высокую надёжность. На такой подстанции возможно проведение прогрессивного мониторинга, когда неопасные отклонения от номинальных параметров (например, тока нагрузки) отделяются от опасных. Эксплуатация такого оборудования значительно упрощается.

Применение самоуправляемых аппаратов помогает также решать задачи, связанные с управлением сроком службы оборудования (продлением срока службы, определением остаточного срока службы и др.). Управляемая коммутация способствует снижению воздействий на оборудование, тем самым увеличивая его срок службы. По результатам мониторинга и диагностики можно оценивать степень износа и старения узлов аппарата, делать выводы о его остаточном сроке службы.

#### Области применения аппаратов с управляемой коммутацией

1. Коммутация конденсаторных батарей. Использование управляемой коммутации конденсаторных батарей эффективно как при включении, так и при отключении цепи. При управляемом включении существенно уменьшаются броски тока и возникающие перенапряжения, а при управляемом отключении снижается вероятность повторных пробоев [2]. Оптимальным моментом для включения является момент, когда напряжение на раз-

рыве выключателя проходит через нуль. Чем дальше момент включения от нулевого значения напряжения на разрыве, тем выше броски тока и перенапряжения. Как показывают расчёты, при включении в момент времени, удалённый от нуля напряжения на 1 мс, броски тока и перенапряжения намного меньше, чем при неуправляемом включении. Однако и в этом случае при включении секций составной конденсаторной батареи броски тока могут достигать шестикратного значения (по сравнению с номинальным током). Только при включении каждого полюса выключателя с отклонением от нуля напряжения не более, чем на 0,1 мс, можно говорить, что броски тока и перенапряжения практически отсутствуют.

Обеспечение малых отклонений момента включения от нуля напряжения (не более  $\pm 1$  мс) является довольно сложной задачей, если учесть реальные разбросы собственно времени включения выключателя и разбросы напряжения пробоя промежутка между сближающимися контактами. Разбросы времени включения растут по мере износа выключателя, с изменением температуры окружающей среды, при колебаниях напряжения питания вторичных цепей и пр.

При отключении конденсаторных батарей требования по ограничению разбросов момента размыкания контактов не такие жёсткие, как при включении. Как видно из рис. 1, для каждого выключателя существует благоприятное временнное «окно» в начале полупериода тока  $i$ . Если момент размыкания контактов и появления дуги  $t_1$  попадает в это «окно» (интервал 5–7 мс и более до перехода

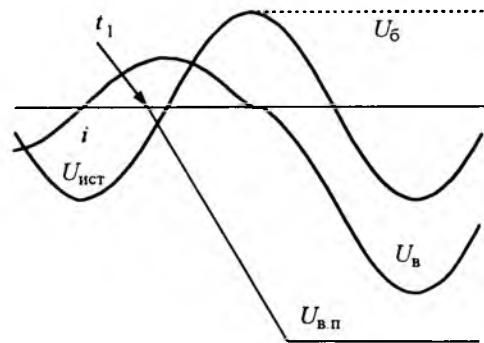


Рис.1. Выбор момента размыкания контактов при отключении конденсаторной батареи

тока через нуль), то электрическая прочность промежутка  $U_{\text{в.п}}$  успеет восстановиться раньше максимума восстанавливавшегося напряжения  $U_{\text{в}}$  и вероятность повторных пробоев будет очень мала. Попадание в это "окно" возможно при разбросах собственного времени отключения выключателя, не превышающих  $\pm 2$  мс.

Преимущества управляемой коммутации конденсаторных батарей очевидны, и большинство установленных в мире выключателей с управляемой коммутацией работают в цепях конденсаторных батарей.

2. Коммутация ненагруженных линий. Неуправляемая коммутация ненагруженных линий может приводить к перенапряжениям как при включении, так и при отключении линий. Поэтому при неуправляемой коммутации должны быть приняты меры по ограничению перенапряжений (установка ОПН, предвключаемых резисторов и др.). Управляемая коммутация ненагруженных линий дает возможность существенно снижать уровень перенапряжений. При управляемом включении важно, чтобы момент включения был как можно ближе к моменту, когда напряжение на разрыве выключателя минимально (в интервале  $\pm 1$  мс от минимума напряжения). Особенno эффективна управляемая коммутация при автоматическом повторном включении, когда на линии остается заряд и перенапряжения могут достигать больших значений.

При управляемом отключении ненагруженных линий, как и при отключении конденсаторных батарей, необходимо разомкнуть контакты не менее чем за 5–7 мс до нуля тока с точностью  $\pm 1\div 2$  мс, чтобы избежать повторных пробоев.

Как показали исследования [3], наиболее эффективной с точки зрения ограничения перенапряжений при коммутации ненагруженных линий оказалась комбинация управляемой коммутации и установки ОПН. В этом случае кратность перенапряжений даже для длинных линий была ниже 2.

3. Коммутация шунтирующих реакторов. Управляемая коммутация существенно снижает воздействия на оборудование как при включении, так и при отключении шунтирующих реакторов. При управляемом включении удается избежать больших бросков тока,

опасных для обмоток реакторов и другого оборудования. Наиболее опасным является включение в момент, близкий к переходу напряжений через нуль, при большой апериодической составляющей тока и большой постоянной времени затухания апериодической составляющей. Поэтому управляемое включение должно проводиться в момент максимума напряжения в каждом из полюсов с точностью  $\pm 1/2$  мс.

Отключение шунтирующих реакторов может сопровождаться перенапряжениями, вызванными срезом тока или повторными зажиганиями дуги. Уменьшение тока среза и вероятности повторного зажигания дуги связано с противоречивыми требованиями к моменту размыкания контактов выключателя при управляемом отключении. Для уменьшения тока среза контакты выключателя должны расходиться вблизи перехода тока через нуль. Уменьшение вероятности повторного зажигания дуги возможно при противоположном условии – при времени горения дуги не менее 5–7 мс. На рис. 2 показано временнное "окно" в полупериоде отключаемого тока  $i$ , в которое должен попадать момент размыкания контактов (МРК) при управляемом отключении. За время горения дуги  $t_d = 5 \div 7$  мс контакты разойдутся на расстояние, при котором восстановливающаяся электрическая прочность  $U_{в.п}$  окажется выше восстановливающегося напряжения  $U_b$  и удастся избежать повторных зажиганий дуги. Для достижения этой цели разбросы собственного времени отключения выключателя не должны превосходить  $\pm 1 \div 2$  мс.

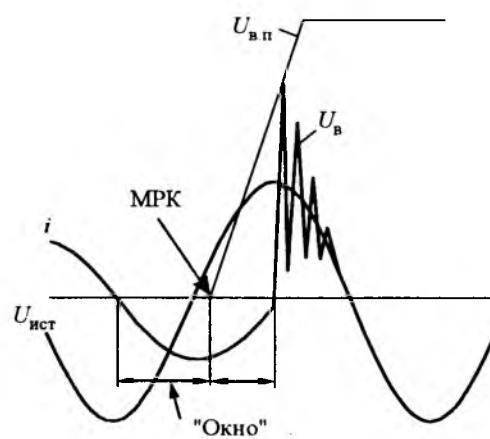


Рис.2. Выбор момента размыкания контактов при отключении шунтирующего реактора

С точки зрения, возникновения перенапряжений повторные зажигания дуги представляют большую опасность, чем срез тока. Частоты и скорости роста напряжения на реакторе при повторном зажигании дуги могут быть очень велики (100–200 кВ/мкс), и при таких высоких скоростях роста напряжения почти всё напряжение прикладывается к первым виткам обмотки реактора. Это очень опасно для изоляции реактора. Кроме того, при повторном зажигании дуги может происходить виртуальный срез тока, который вызывает перенапряжения. Поэтому управляемое отключение реактора должно быть реализовано, исходя из требований, при которых исключаются повторные зажигания дуги. Условие  $t_d \geq t_{dmin}$  ( $t_{dmin}$  – минимальное время горения дуги, равное 5–7 мс), невыполнимо для всех полюсов выключателя, если полюса размыкаются одновременно. Если ставится требование полного отсутствия повторных зажиганий, необходимо использовать выключатель с управлением размыкания каждого полюса раздельно.

4. Коммутация трансформаторов. Требования к управляемой коммутации трансформаторов близки к требованиям, предъявляемым при коммутации шунтирующих реакторов. Особенностью выбора момента включения цепи является то, что при включении ненагруженных трансформаторов необходимо учитывать остаточный магнитный поток. Если полярность остаточного магнитного потока совпадает с полярностью потока при включении, то неуправляемое включение может привести к очень большим броскам тока. Управляемое включение даёт возможность существенно уменьшить броски тока. При этом учёт остаточного магнитного потока может заключаться, например, в сравнении реального магнитного потока с ожидаемым потоком [4]. На рис.3 показана оптимальная последовательность включения трёх фаз при остаточном потоке  $\Phi_{ост} = 70, 0, -70\%$  [4]. Моменты включения фаз выбираются таким образом, чтобы реальное значение магнитного потока  $\Phi$  было равно ожидаемому  $\Phi_o$ . Поэтому первая фаза включается в момент времени  $X$ , а две другие фазы – одновременно в момент времени  $Y$  или  $Z$ . Разбросы времени включения выключателя не должны превы-

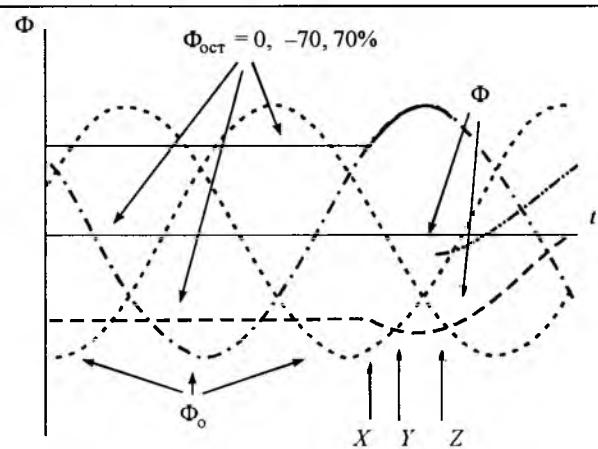


Рис.3. Последовательность включения полюсов ненагруженного трансформатора при управляемой коммутации

шать  $\pm 1$  мс с учётом того, что имеются разбросы пробивного напряжения промежутка между сближающимися контактами.

5. Коммутация токов КЗ. Управляемая коммутация токов КЗ даёт возможность сократить время горения дуги до минимальных значений. При отключении минимальное время горения дуги определяется из условия, что за это время контакты должны разойтись на расстояние, достаточное для успешного гашения дуги при переходе тока через нуль. Без сомнения, при неуправляемом отключении средняя длительность горения дуги превосходит минимальную. Поэтому управляемое отключение токов КЗ является средством, обеспечивающим уменьшение электрической эрозии частей дугогасительного устройства и повышение ресурса выключателя. Для вакуумного выключателя кроме указанных преимуществ при управляемой коммутации можно ожидать и увеличение отключающей способности.

Управляемое отключение КЗ не должно существенно увеличивать время КЗ за счёт задержки команды на отключение. Кроме того, минимальная длительность горения дуги и момент размыкания контактов должны быть оптимизированы. С увеличением скорости размыкания контактов уменьшаются минимальная длительность горения дуги и электрическая эрозия частей дугогасительного устройства. Однако рост скорости размыкания контактов приводит к повышению механических нагрузок на элементы выключателя, что не всегда допустимо.

Противоречивые требования к моменту включения имеют место и при управляемом включении на КЗ. Включение вблизи нуля напряжения на выключателе существенно сокращает длительность горения дуги включения и энергию, выделяемую в промежутке. Однако при этом велики апериодическая составляющая тока, ударный ток и электродинамические силы, действующие на элементы выключателя и другого оборудования. Поэтому при выборе момента включения следует учитывать два параметра – ударный ток и выделенную в дуге включения энергию.

Управляемая коммутация номинальных токов также дает возможность улучшить характеристики выключателя – повысить его ресурс (что особенно важно, если выключатель работает в режиме частых коммутаций), предотвратить виртуальный срез тока и др.

6. Повышение номинальных параметров. При управляемой коммутации сокращаются коммутационные перенапряжения и становится возможным увеличение номинального напряжения выключателя. В [5] приведены примеры повышения номинального напряжения выключателя за счёт управляемой коммутации (увеличение номинального напряжения с 145 до 170 кВ при отключении конденсаторной батареи, а также повышение напряжения с 300 до 400 кВ при включении линий). Кроме того, элегазовый выключатель за счёт введения управляемой коммутации становится работоспособным при более низких температурах окружающей среды.

Применение управляемой коммутации на установленных много лет назад выключателях позволяет продлить их срок службы тогда, когда характеристики выключателей становятся неприемлемыми. Такая ситуация может сложиться при интенсивном развитии сетей, а также при появлении новых потребителей энергии с более высокими требованиями к её качеству. Введение системы управляемой коммутации на старых выключателях может решить эти проблемы при приемлемых электромеханических характеристиках этих выключателей.

#### Требования к самоуправляемым коммутационным аппаратам

1. Требования к изоляции дугогасительных устройств. Для упомянутых областей приме-

нения управляемой коммутации необходимо иметь аппараты, которые соответствуют специальным требованиям по изоляционным, механическим и другим характеристикам. С точки зрения диэлектрических характеристик выбранный для работы в режиме управляемой коммутации выключатель должен иметь достаточно высокую скорость спада электрической прочности межконтактного промежутка при включении, достаточно малые разбросы пробивного напряжения и достаточно большую скорость восстановления электрической прочности при отключении. Не каждый выключатель удовлетворяет этим требованиям, особенно, если речь идёт об одноразрывных выключателях высокого напряжения. Например, включение конденсаторных батарей должно происходить вблизи нуля напряжения на выключателе, т.е. электрическая прочность межконтактного промежутка должна снижаться перед включением с достаточно большой скоростью. Это накладывает ограничение на использование одноразрывных элегазовых выключателей в режиме управляемого включения при напряжениях 220 кВ и выше.

При управляемой коммутации шунтирующих реакторов или отключении конденсаторных батарей требования к скорости изменения электрической прочности межконтактного промежутка таковы, что стандартные выключатели вполне подходят для этих режимов.

При управляемом включении конденсаторных батарей высокую скорость спада электрической прочности промежутка можно получить за счёт использования управляемых разрядников (например, вакуумных управляемых разрядников при напряжениях до 110 кВ).

2. Требования к механическим характеристикам аппаратов. К аппаратам с управляемой коммутацией предъявляются очень жёсткие требования по стабильности времени включения и времени отключения (разбросы не более  $\pm 1\div 2$  мс). Достижение столь малых разбросов (особенно  $\pm 1$  мс) связано с большими трудностями при использовании стандартных выключателей. При этом требуется пополюсное управление выключателем.

Разбросы времени включения и отключения не должны превышать допустимые значения при изменении температуры окружающей среды, при колебаниях напряжения

**Влияние различных факторов на разбросы времени включения и времени отключения  
стандартных выключателей**

Изменение параметра	Воздушный выключатель		Элегазовый выключатель					
			Гидравлический привод		Пружинный привод		Пневматический привод	
	Отключе- ние	Вклю- чение	Отключе- ние	Вклю- чение	Отключе- ние	Вклю- чение	Отключе- ние	Вклю- чение
Температуры в диапазоне от -40 до +40°C	50 мкс/°C	50мкс/°C	50мкс/°C	50мкс/°C	50мкс/°C	50мкс/°C	± 1,0мс	± 1,5мс
Напряжения питания от -15 до + 10%	Не влияет	Не влияет	± 0,5мс	± 1,5мс	± 0,5мс	± 0,5мс	± 1 мс	± 1,5мс
Запасаемой энергии ±5%	Не влияет	Не влияет	± 0,5мс	от -3мс до +2,5мс	± 0,5мс	от -3мс до +2,5мс	Не влияет	Не влияет
Числа операций	± 1 мс	+ 0,5мс	± 1мс	± 2,5мс	+ 1,5мс	+ 2,5мс	± 1,5мс	± 1 мс
После редких операций (через 10 лет)	± 1 мс	± 1,5мс	Не влияет	± 10 мс	Не влияет	± 10 мс	Не влияет	Не влияет

питания, а также в результате износа и старения узлов выключателя.

Реальные разбросы времени срабатывания зависят от типа выключателя, от типа используемого привода. В таблице представлены результаты [6] измерения реальных разбросов времени срабатывания различных стандартных выключателей.

Как видно из таблицы, разбросы времён срабатывания стандартных выключателей при изменении условий их работы слишком велики для того, чтобы такие выключатели могли бы быть использованы в режимах управляемой коммутации. Для работы в режимах управляемой коммутации должны использоваться специальные выключатели со стабильными электромеханическими характеристиками. Некоторые изменения времени срабатывания могут быть скомпенсированы, учтены в программе контроллера, например, изменения за счёт износа при наработке ресурса, за счёт старения элементов выключателя и др. Предельно малые времена срабатывания и предельно малые разбросы могут быть достигнуты при использовании гибридных аппаратов, в которых контакты выключателя шунтируются управляемым разрядником (например, вакуумным), время включения которого не превосходит 2–3 мкс при разбросах не более ±1 мкс.

3. Требования к системам управления аппаратов, обладающих "интеллектом".

Одним из основных требований, которые

предъявляются к системам управления "умных" аппаратов, является адаптивность управления. Это означает, что изменения времени срабатывания, вызванные различными факторами (колебаниями температуры окружающей среды, износом узлов, колебаниями напряжения питания вторичных цепей и др.) должны в значительной степени компенсироваться системами управления.

Системы управления должны быть надёжны, а расходы на их эксплуатацию – минимальны. Система управления должна осуществлять контроль за правильностью операций, производимых аппаратом в первичной цепи. В системе управления должна быть предусмотрена возможность проверки её оперативных характеристик без проведения реальных коммутаций аппаратом. Работоспособность системы управления должна сохраняться и после коммутации токов КЗ. Должен быть предусмотрен мониторинг, который давал бы информацию о том, правильно или с отклонениями от норм производится операция отключения и включения.

Наконец, система управления должна быть рассчитана и испытана на соответствие её основных характеристик заданным при различных воздействиях – в условиях изменения напряжения питания и его частоты, перенапряжений, механических воздействий, воздействия электромагнитных полей и др.

4. Требования к системам диагностики и мониторинга. Системы диагностики и мони-

торинга должны повышать оперативную готовность и надёжность оборудования при минимальных затратах. По данным 2-го Международного опроса об отказах выключателей высокого напряжения, проведенного СИГРЭ, наиболее часто отказы связаны с неисправностью следующих элементов выключателя: привода, цепей управления, уплотнений элементов выключателей, электрической изоляции [7]. Эти элементы должны быть охвачены системами диагностики и мониторинга в первую очередь. Отказы, связанные с неисправностью дугогасительной системы происходят намного реже.

Надёжность систем диагностики должна быть выше надёжности выключателя. Только при выполнении этого требования можно получить выигрыш в надёжности оборудования.

Системы диагностики и мониторинга дают возможность не только повысить надёжность оборудования и избежать крупных аварий, но и улучшить условия эксплуатации за счёт обоснованного увеличения межремонтного периода.

Для самоуправляемых электрических аппаратов необходимы системы прогрессивного мониторинга, когда аппарат не только фиксирует отклонения параметров от номинальных, но и анализирует эти отклонения, отделяя опасные случаи от неопасных. Например, при непрерывном росте тока нагрузки аппарат должен отделять опасные с точки зрения срока службы режимы от неопасных. Отделяя опасные ситуации от неопасных, самоуправляемый аппарат определяет, необходимы ли немедленные действия по исправлению ситуации или эти действия могут быть произведены позднее.

Наибольший эффект от применения самоуправляемых аппаратов имеет место, если самоуправляемость реализуется на уровне подстанции. Это дает возможность максимально совместить функции управления и защи-

ты оборудования, координировать работу "умных" аппаратов, осуществлять оптимальные режимы эксплуатации.

### Заключение

В мире растёт число коммутационных аппаратов с управляемой коммутацией, а также аппаратов, оснащённых системами мониторинга и диагностики. Такие аппараты можно считать шагом по пути создания самоуправляемого оборудования, с помощью которого можно значительно повысить надёжность оборудования, снизить воздействия и облегчить изоляцию, уменьшить эксплуатационные затраты и др. Максимальный эффект от использования самоуправляемых коммутационных аппаратов достигается при комплексном подходе к решению задачи, когда весь комплекс электрооборудования подстанции проектируется, исходя из требований, вытекающих из режимов работы самоуправляемых аппаратов.

### Список литературы

1. Questionnaire concerning aspects on planning, design, operation and maintenance of the future substation // Electra. 2000. № 191. P. 77–83.
2. Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Guide for application lines, reactors, capacitors, transformers // Electra. 1999. №183. P. 43–73. №185. P.37–57.
3. Frolich K. Controlled closing on shunt reactor compensated transmission lines // IEEE PWRD. 1997. Vol.12, №2.
4. Controlled switching of unloaded power transformers // Electra. 2004. №212. P. 39–47.
5. Controlled switching: non-conventional applications // Electra. 2004. №214. P. 29–39.
6. Controlled switching – a state-of-the-art survey (part 1) // Electra. 1995. №163. P. 65–97.
7. Application of diagnostic techniques for high voltage circuit-breakers // Session CIGRE, 1992. P. 13–101.

**Белкин Герман Сергеевич** – начальник отдела вакуумной коммутационной аппаратуры ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина. В 1962 г. окончил электроэнергетический факультет МЭИ. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Работоспособность контактов из многокомпонентных материалов в высоковольтных вакуумных аппаратах".

# Внешние характеристики устройств гибких передач переменного тока и их влияние на характеристики мощности управляемых линий электропередачи переменного тока

ИВАКИН В.Н.

Рассмотрены внешние характеристики устройств, применяемых для создания гибких (управляемых) линий электропередачи переменного тока. Показаны особенности внешних характеристик устройств и их влияние на диапазоны регулирования мощности, статическую и динамическую устойчивость.

*Functional characteristics of the FACTS devices are considered. Features of functional characteristics of FACTS devices and their influence on attainable ranges of regulation of transmission power, static and dynamic stability are shown.*

Изменения в режимах работы электроэнергетических сетей, связанные с переходом к открытому рынку в торговле электроэнергии, способствуют увеличению спроса на новые устройства, обеспечивающие повышение эффективности использования линий электропередачи, в значительной степени за счёт улучшения их управляемости.

В последнее время, когда говорят о управляемых передачах переменного тока, используют термин "устройства FACTS", как обобщающего названия технологии создания гибких передач переменного тока (Flexible AC Transmission Systems).

К настоящему времени разработаны и применяются в электроэнергетических системах различных странах устройства, обеспечивающие возможность активного управления режимами работы электропередачи, включая регулирование потоков мощности, т.е. предназначенные для создания гибких (управляемых) электропередач (ГЭП) [1]. Эти устройства основаны на применении мощной преобразовательной техники и силовой электроники с использованием силовых полупроводниковых приборов (СПП), включая полностью управляемые СПП типа GTO, IGCT, IGBT и др. Устройства FACTS существенно отличаются друг от друга принципиальной схемой, составом оборудования и функциональными возможностями. К сожалению, в отечественной литературе практически отсутствуют публикации, связанные со сравнительным анализом этих устройств, как эле-

ментов электрической системы, характеризующихся особенностями их внешних характеристик и влиянием на режим работы электрической сети.

Наиболее многофункциональные устройства FACTS, в основном, базируются на применении мощных преобразователей напряжения (ПН) [2]. По принципу и условиям работы в электроэнергетической системе ПН этого типа относятся к инверторам напряжения ведомым сетью, называемым в зарубежной научно-технической литературе VSC (Voltage Sourced Converter). Из множества известных схем ПН наибольшее применение нашли двух- и трёхуровневые преобразователи (рис.1). Трёхуровневые преобразователи часто называют NPC (Neutral Point Clamped) преобразователями. Наиболее известным устройством FACTS на основе ПН является СТАТКОМ (STATCOM). Основное его назначение – компенсация реактивной мощности и поддержание напряжения в заданном узле электрической сети. Аналогичное назначение имеет и хорошо известное устройство – статический тиристорный компенсатор (СТК) [3]. Одна из принципиальных схем СТК показана на рис.2. Внешние характеристики СТАТКОМ и СТК показаны на рис.3.

Принципиальная разница этих устройств заключается в том, что СТК представляет собой управляемое реактивное сопротивление (проводимость), а СТАТКОМ – управляемую синхронную ЭДС за собственным реактансом. Как правило, внешние характеристики

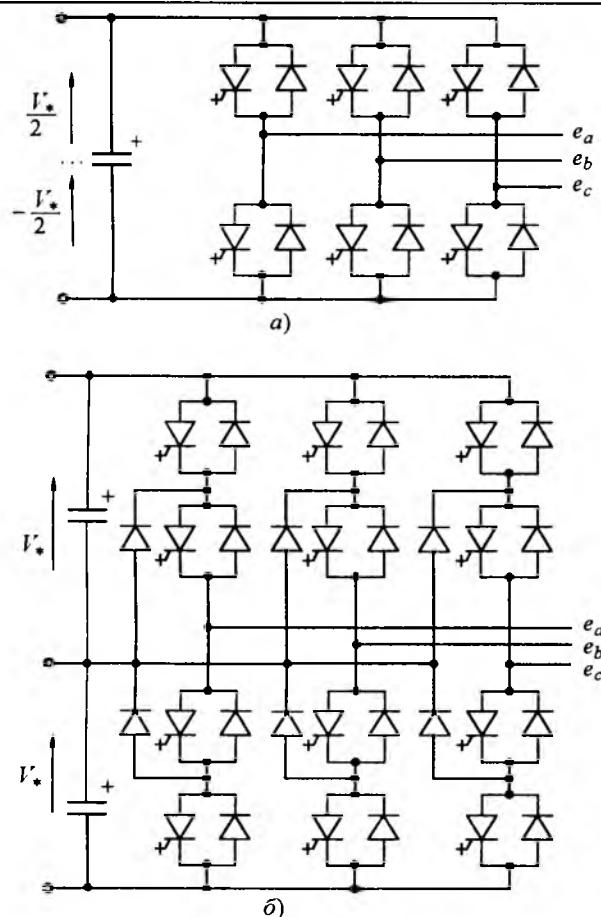


Рис.1. Принципиальные схемы двухуровневых (а) и трёхуровневых (б) преобразователей напряжения

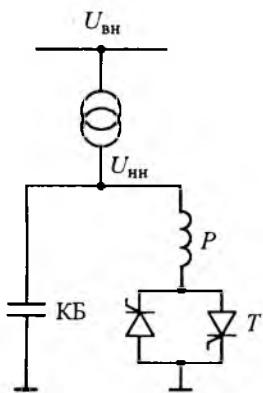


Рис.2. Принципиальная схема СТК

СТК и СТАТКОМ представляют в виде одной зависимости, имеющей вид, показанный на рис.3 жирной линией и соответствующей номинальному расчётному режиму устройства. Однако как регулируемые устройства СТК и СТАТКОМ имеют внешние характеристики, которые можно характеризовать двумя областями режимов: первая – область режимов, в которых устройство может работать длительно, ограниченная максимальными и минимальными уровнями рабочего

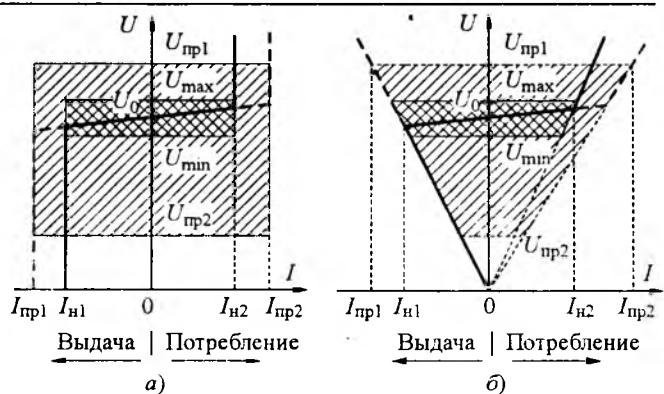


Рис.3. Внешние характеристики СТАТКОМ (а) и СТК (б):

штриховка – область кратковременных режимов; штриховка – область длительной работы

напряжения ( $U_{\text{макс}}$ ,  $U_{\text{мин}}$ ) и номинальными токами ( $I_{\text{н1}}$ ,  $I_{\text{н2}}$ ); вторая – область кратковременных режимов, обусловленных переходными режимами или условиями, ограничивающими допустимыми предельными значениями напряжений ( $U_{\text{пп1}}$ ,  $U_{\text{пп2}}$ ) и токов ( $I_{\text{пп1}}$ ,  $I_{\text{пп2}}$ ). Максимальные предельные значения определяют перегрузочные способности устройства, а минимальные – возможность работы в различных аварийных или послеаварийных условиях, сопровождающихся значительными посадками напряжения в сети. Работа в области перегрузки ограничивается её допустимым значением и длительностью и зависит от многих факторов. Дорогостоящие устройства, какими являются СТАТКОМ и СТК, как правило, проектируются так, чтобы максимально использовать возможности элементной базы силовой электроники, поэтому допустимая перегрузка по току зависит от типа полупроводниковых приборов, но обычно не превышает 15–20% при длительности менее 1 с.

Для того, чтобы оценить влияние характеристик СТК и СТАТКОМ на передаваемую мощность рассмотрим упрощённую схему электропередачи (рис.4), связывающей две системы  $S_1$  и  $S_2$  с компенсирующим устройством (КУ) в середине ЛЭП.

Пусть напряжение на шинах передающей системы

$$\dot{U}_1 = V\angle(\delta/2) = V(\cos(\delta/2) + j \sin(\delta/2)), \quad (1)$$

а напряжение на шинах приёмной системы

$$\dot{U}_2 = V\angle(-\delta/2) = V(\cos(\delta/2) - j \sin(\delta/2)). \quad (2)$$

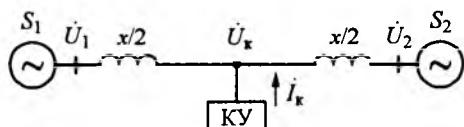


Рис.4. Принципиальная схема ЛЭП с шунтовым КУ в середине

Если мощность КУ равна нулю, то поток активной мощности в передаче определяется выражением

$$P(\delta) = \frac{V^2}{r} \sin \delta = P_0 \sin \delta, \quad (3)$$

где  $P_0$  – предельное значение передаваемой мощности ЛЭП без КУ.

Если КУ обеспечивает поддержание напряжения в середине ЛЭП ( $U_k$ ) равное  $V$  во всем диапазоне передаваемой мощности, то КУ как бы делит ЛЭП на две независимые части, каждая из которых имеет сопротивление  $x/2$ , поэтому поток активной мощности по передаче

$$P(\delta) = \frac{2V^2}{x} \sin \delta / 2 = 2P_0 \sin \delta / 2. \quad (4)$$

При этом реактивная мощность КУ

$$Q(\delta) = \frac{4V^2}{\pi} (1 - \cos \delta/2) = 4P_0(1 - \cos \delta/2). \quad (5)$$

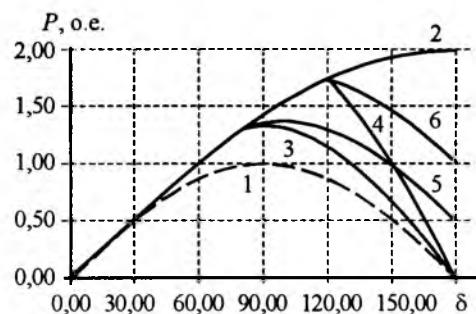
Как следует из выражения (5), мощность КУ может превышать предел передаваемой мощности в 2 раза. На практике мощность КУ ограничивается значительно меньшими значениями. В этом случае характер зависимости будет определяться особенностями внешних характеристик КУ вне регулировочного диапазона поддержания заданного напряжения  $V$ . В частности, максимальная выдаваемая мощность СТК будет определяться эквивалентной ёмкостью конденсаторных батарей  $b_{\max}$ , а СТАТКОМ – максимальным током преобразователя  $I_{\max}$ . Таким образом, в пределах регулировочного диапазона КУ (СТК или СТАТКОМ) зависимость  $P(\delta)$  определяется (4), а вне этого диапазона зависимостями:

$$P(\delta) = \frac{2V^2}{x(1-xb_{\max}/4)} \sin \delta \quad (6)$$

– при установке СТК;

$$P(\delta) = \frac{V^2}{x} \sin \delta + \frac{1}{2} V I_{\max} \sin \delta / 2 \quad (7)$$

– при установке СТАТКОМ.



**Рис.5.** Зависимости мощности от угла передачи с КУ:

$$1 - Q_{KY} = 0,0; 2 - Q_{KY} = 4,0; 3 - Q_{CTK} = 1,0; 4 - Q_{CTK} = 2,0; 5 - Q_{СТАТКОМ} = 1,0; 6 - Q_{СТАТКОМ} = 2,0$$

Расчётные зависимости  $P(\delta)$  при установке КУ разной мощности в относительных единицах представлены на рис.5. За базисное значение принята мощность  $P_0$ .

Как следует из анализа (6) и (7), при мощности КУ менее  $P_0$  предел передаваемой мощности или предел по статической устойчивости ЛЭП с СТАТКОМ несколько выше, чем при установке СТК, однако при больших значениях мощности КУ предел один и тот же.

В то же время, влияние СТАТКОМ на увеличение динамической устойчивости электропередачи с ростом мощности гораздо более значительное, чем СТК той же мощности. Это можно проиллюстрировать рис.6. Пусть исходный режим передачи определяется мощностью  $P = 0,8$  о.е., угол между векторами напряжений по концам передачи при этом равен  $\delta_1$ , а в период КЗ мощность передачи падает до нуля и за счёт ускорения эквивалентного генератора угол увеличивается до  $\delta_2$ . Устойчивость системы может быть оценена по методу сравнения площадок ускорения  $S_y$  и торможения  $S_t$ , а запас по устойчивости – по площади  $S_{зап}$ . Как видно из рис.6, запас по динамической устойчивости, пропорциональный площади участков  $S_{зап}$ , для ЛЭП с СТАТКОМ существенно больше, чем для ЛЭП с СТК.

В ряде случаев, для конкретных применений КУ в электроэнергетических системах, возникает необходимость иметь внешние характеристики КУ с областью диапазона регулирования, отличающиеся от характерных и показанных на рис.3. В этом случае целесообразно рассмотреть различные возможные комбинации СТК и СТАТКОМ с нерегулиру-

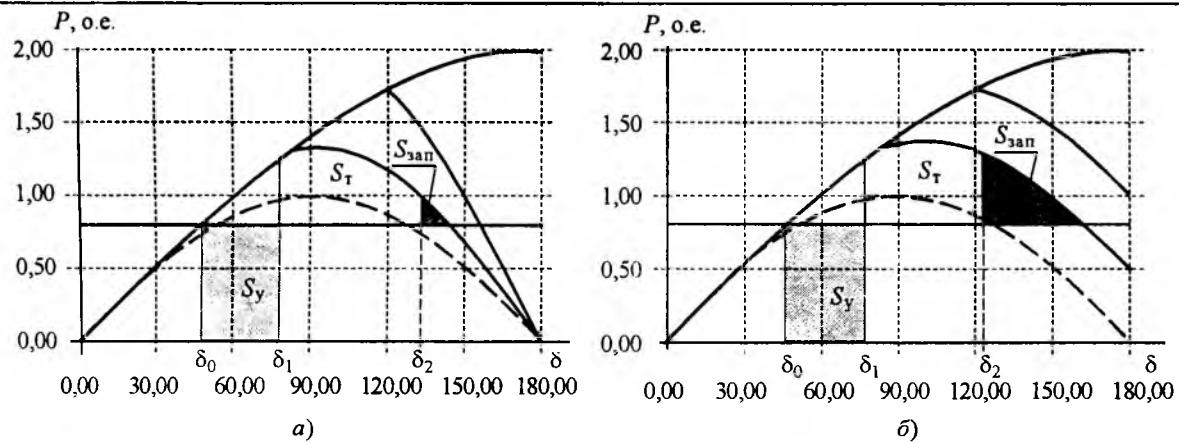


Рис.6. Влияние СТК (а) и СТАТКОМ (б) на динамическую устойчивость ЛЭП

емыми источниками реактивной мощности (реакторы (ШР), конденсаторные батареи (КБ) и др.), позволяющие смещать диапазоны регулирования в ту или иную сторону. На рис. 7 представлены некоторые возможные

комбинации и соответствующие внешние характеристики таких КУ. Изменяя соотношения мощностей элементов, можно изменять диапазоны регулирования, обеспечивая получение требуемых характеристик и минимизируя общую стоимость КУ.

К управляемым устройствам продольной компенсации, в первую очередь, необходимо отнести тиристорные устройства продольной компенсации (ТУПК), предусматривающие включение последовательно в ЛЭП управляемого реактивного сопротивления [4]. В англоязычной литературе такое устройство получило название Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC). Кроме ТУПК большой интерес представляют устройства на основе СТАТКОМ, предусматривающие включение последовательно в ЛЭП управляемой ЭДС. Известны различные варианты таких устройств [2], однако они могут быть объединены в две основные группы. К первой относятся устройства без источника активной энергии на стороне постоянного тока преобразователя СТАТКОМ, а ко второй – с таким источником. Первая группа устройств в англоязычной литературе получила название Static Synchronous Series Compensator (SSSC), а вторая – Static Series Compensator (SSC). Характеристики первой группы определяются тем, что устройства SSSC обеспечивают возможность обмена с системой только реактивной мощностью, т.е. создают ЭДС

$$\dot{U}_q = k i e^{\pm j\pi/2}$$

Устройства SSC, создавая ЭДС  $\dot{U}_q = U e^{j\phi}$ , имеют возможность обмена с системой не только реактивной, но и активной мощностью. Обмен активной мощностью

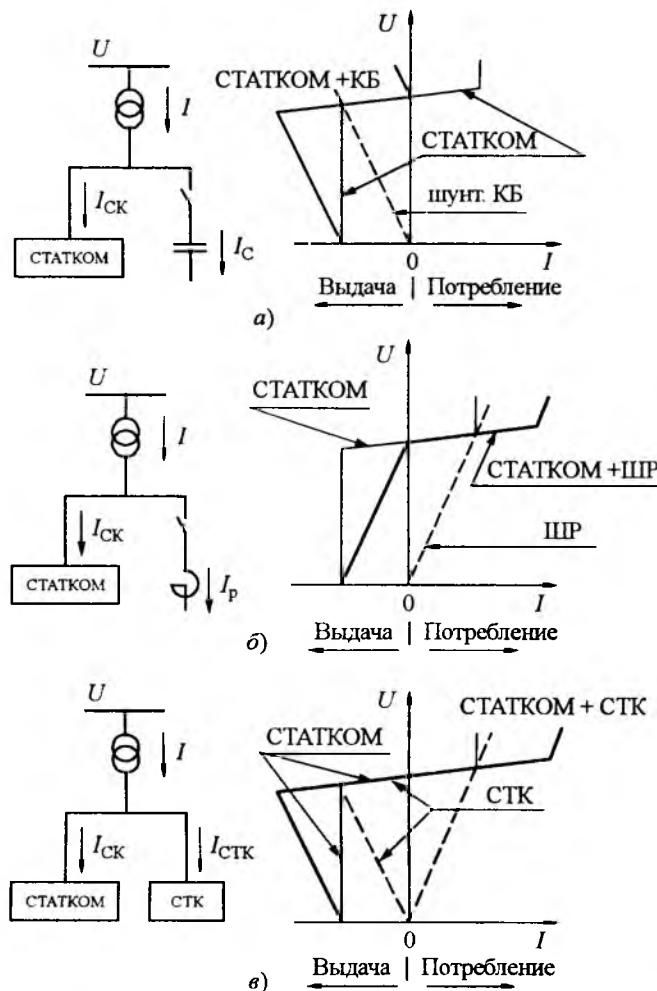


Рис.7. Принципиальные схемы и внешние характеристики КУ на основе комбинаций СТК, СТАТКОМ и неуправляемых реактивных элементов:

а – СТАТКОМ и КБ; б – СТАТКОМ и ШР; в – СТАТКОМ и СТК

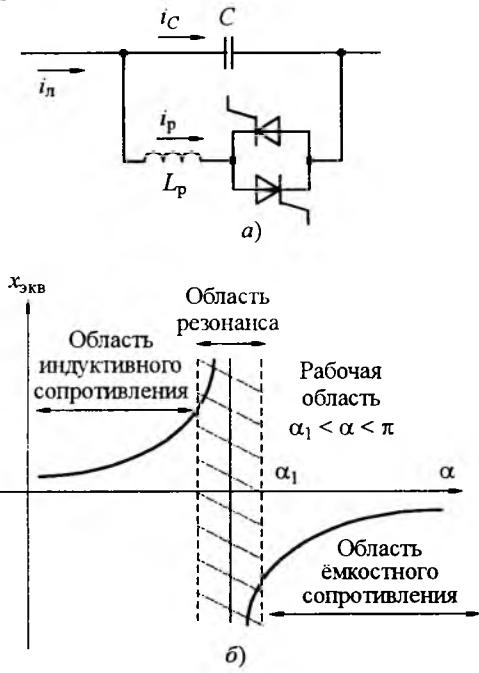


Рис.8. Принципиальная схема ТУПК (а) и зависимость эквивалентного сопротивления  $X_{экв}$  от угла управления (б)

может быть без ограничения длительности, как, например, в варианте схемы устройства со связью по стороне постоянного тока с шунтовым преобразователем, а также и некоторое ограниченное время, как, например, в варианте устройства с накопителем энергии, ёмкость которого и определяет характер обмена активной мощностью.

Принципиальная упрощённая схема ТУПК представлена на рис.8,а. ТУПК представляет собой конденсаторную батарею, включающую последовательно в линию электропередачи, и тиристорно-реакторную фазу (ТРФ), подключаемую параллельно конденсаторной батарее. Управляя углом включения тиристоров можно изменять эквивалентное сопротивление ТРФ и, соответственно, всей установки продольной компенсации (ТУПК), регулируя таким образом коэффициент компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП. Зависимость изменения эквивалентного сопротивления ( $x_{экв}$ ) от угла управления тиристоров  $\alpha$  зависит от параметров схемы и, в основном, имеет вид, представленный на рис. 8,б. Рабочая область, как правило, соответствует ёмкостному диапазону сопротивления, обеспечивающему компенсацию индуктивного сопротивления ЛЭП. В рабочей области сопротивление ТУПК может принимать

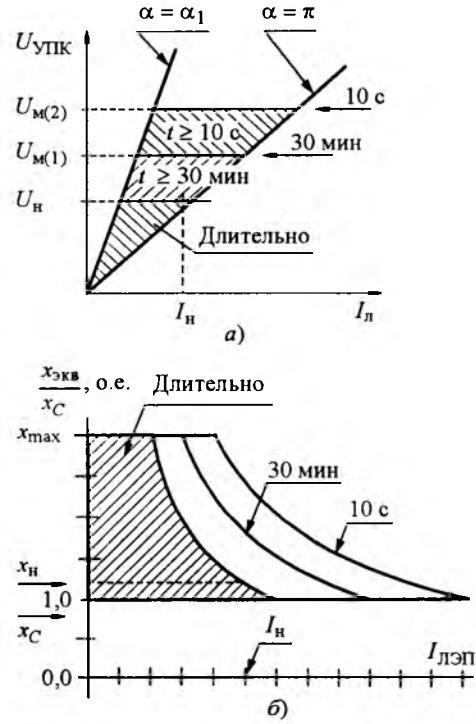


Рис.9. Внешние характеристики ТУПК

любое значение в диапазоне  $x_{max} \geq x_{экв} \geq x_{min}$ , соответствующих рабочему диапазону изменения угла управления  $\alpha_1 \leq \alpha \leq \pi$ . Система управления должна исключать возможность работы в зоне резонанса. Внешняя характеристика устройства ТУПК, представляемая в виде функции  $U(I_{ЛЭП})$ , имеет вид, показанный на рис.9,а. Ток в ЛЭП определяется не только сопротивлением ТУПК, но и режимами примыкающих систем, включая аварийные, поэтому внешняя характеристика ТУПК, отражающая область допустимых режимов работы оборудования, включая перегрузочные, имеет вид, представленный на рис.9,а. Довольно часто, особенно в зарубежной литературе, предпочитают представлять внешнюю характеристику ТУПК не в виде области значений  $U(I)$ , а в виде области значений  $X_{экв}(I)$  (рис.9,б). Допустимые кратности перегрузки ТУПК координируются прежде всего с допустимыми для конденсаторов и в соответствии с требованиями публикации МЭК 60143 составляют 1,35–1,5 и 1,7–2,0 соответственно на 30 мин и 1–10 с.

Принципиальная схема устройства УПК на основе СТАТКОМ (УПК-С) и его внешняя характеристика представлены на рис.10. Характеристики ЛЭП с УПК-С в значительной степени определяются принципами управле-

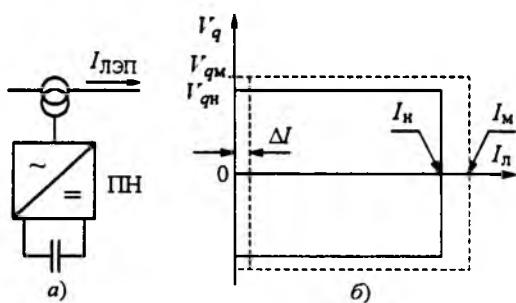


Рис.10. Принципиальная схема (а) и внешняя характеристика УПК-С (б)

ния преобразователем напряжения. Можно выделить два основных принципа:

– поддержание заданного значения эквивалентного реактивного сопротивления независимо от тока ЛЭП; при этом напряжение, вводимое в ЛЭП,  $U_{УПК} = jx_{экв}I = \text{var}$ ;

– поддержание заданного значения напряжения, вводимого в ЛЭП, независимо от тока ЛЭП; при этом напряжение, вводимое в ЛЭП,  $U_{УПК} = jx_{экв}I = \text{const}$ , соответственно  $x_{экв} = \text{var}$ .

Первый принцип управления соответствует режиму работы ТУПК при заданном постоянном угле управления тиристорами. Соответственно и характеристики ЛЭП с ТУПК и с УПК-С, управляемой по первому принципу будут идентичны. Однако это справедливо только при условии, что максимальное допустимое рабочее напряжение SSSC не будет превышено при максимальных токах ЛЭП.

Для оценки влияния рассматриваемых типов управляемой продольной компенсации на характеристики ЛЭП рассмотрим эквивалентную упрощённую схему электропередачи с ТУПК, представляющую эквивалентной ёмкостью  $x_C$  (рис.11) и с УПК-С, представляющую эквивалентным источником напряжения  $U_q$  (рис.12).

Характеристика передаваемой мощности по ЛЭП с ТУПК, показанная на рис.13, определяется выражением

$$P_s = \frac{V^2}{X_L(1-s)} \sin \delta, \quad (8)$$

где  $s = x_C/x_L$ .

Передаваемая мощность по ЛЭП с УПК-С, представленная на рис.14, определяется выражением

$$P_q = \frac{V^2}{X_L} \sin \delta + \frac{V^2}{X_L} V_q \cos(\delta/2). \quad (9)$$

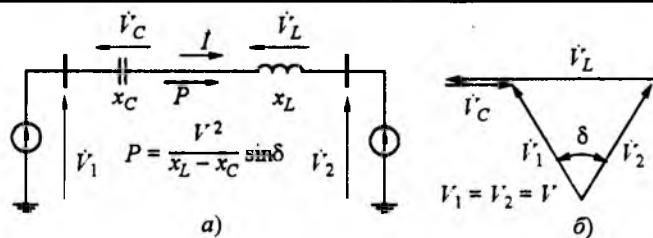


Рис. 11. Эквивалентная схема электропередачи с ТУПК (а) и векторная диаграмма напряжений (б)

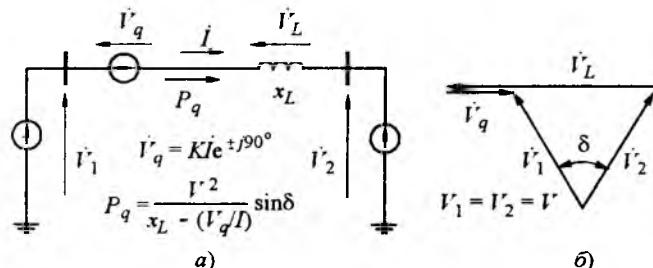


Рис.12. Эквивалентная схема электропередачи с УПК-С (а) и векторная диаграмма напряжений (б)

На рис.15 представлены зависимости максимальной передаваемой мощности ЛЭП от степени компенсации ( $s$ ) и относительной амплитуды напряжения преобразователя УПК-С ( $U_q$ ).

Характеристика ЛЭП с УПК-С (рис.14) построена для условия, что во всем диапазо-

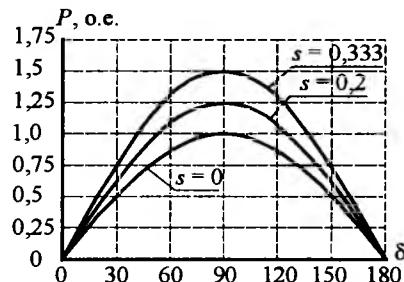


Рис.13. Характеристика мощности ЛЭП с ТУПК

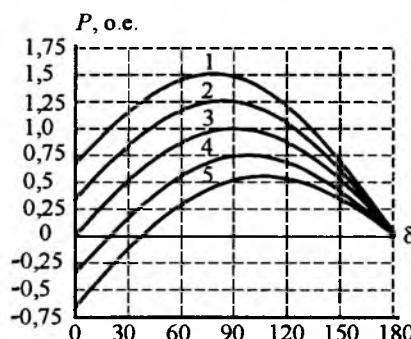


Рис.14. Характеристика мощности ЛЭП с УПК-С типа SSC

1 –  $U_q = 0,673$ ; 2 –  $U_q = 0,353$ ; 3 –  $U_q = 0$ ; 4 –  $U_q = -0,353$ ; 5 –  $U_q = -0,673$

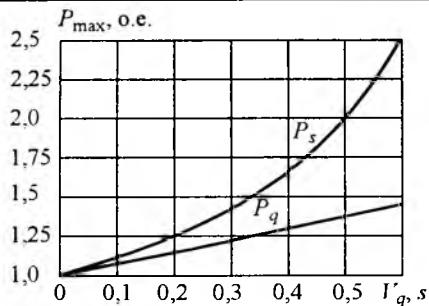


Рис.15. Зависимость максимальной передаваемой мощности от степени компенсации ( $s$ ) и амплитуды напряжения УПК-С ( $V_q$ )

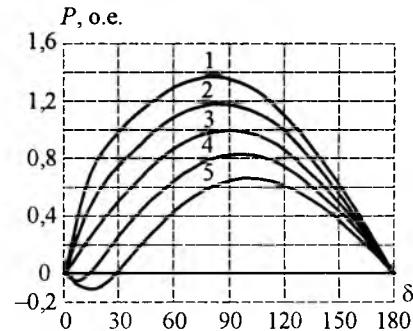


Рис.16. Характеристика мощности ЛЭП с УПК-С типа SSSC

1 –  $U_q = 0,5$ ; 2 –  $U_q = 0,25$ ; 3 –  $U_q = 0$ ; 4 –  $U_q = -0,25$ ; 5 –  $U_q = -0,5$

не углов  $\delta$  напряжение  $U_q$  может поддерживаться постоянным. При малых углах  $\delta$ , когда амплитуда вектора  $U_q$  становится равной падению напряжения на реактивном сопротивлении ЛЭП, это возможно только при условии наличия в составе УПК источника активной мощности, обеспечивающего компенсацию потерь мощности в ЛЭП на активной составляющей сопротивления ЛЭП. Таким образом, характеристика, показанная на рис.14, в зоне малых углов  $\delta$  соответствует УПК с источником энергии на стороне постоянного тока, т.е. УПК-С типа SSC.

Для устройства УПК-С типа SSSC, т.е. без источника энергии на стороне постоянного тока, вид характеристики передаваемой мощности ЛЭП примет вид, показанный на рис.16.

Так как УПК-С – регулируемое устройство, то внешняя характеристика представляет собой область допустимых режимов работы. В отличие от внешней характеристики ТУПК, УПК-С имеет меньшие перегрузочные возможности, определяемые характеристиками преобразователя напряжения. Малая теплопёмкость СПП, максимальное использование коммутирующих способностей СПП для минимизации стоимости преобразователя, ограничение по максимальному коммутируемому току приводят к тому, что максимальный ток ( $I_m$ ) превышает номинальный ( $I_n$ ) обычно не более, чем на 15–20%. При этом ток  $I_m$  не должен превышаться и в переходных режимах, поэтому преобразователь должен иметь быстродействующую систему управления и защиты от перегрузки по току. В зоне малых токов, соответствующих малым углам передачи  $\delta$ , внешняя характеристика зависит

от типа устройства УПК-С (SSSC, SSC) и связана с наличием источника энергии в схеме устройства, обеспечивающего поддержание выходного напряжения. Длительная перегрузка по напряжению, отражаемая на внешней характеристике разницей в номинальном  $V_n$  и максимальном рабочем  $V_m$  напряжениях, обычно не превышает 10–15%. Кратковременные перегрузки по напряжению для преобразователя напряжения устройства УПК-С выбираются в соответствии с условиями работы при функционировании в ЛЭП, поэтому в принципе должны быть не ниже, чем для ТУПК, однако реализация этих требований приводит к значительному удорожанию преобразователя устройства УПК-С по сравнению с преобразователем напряжения СТАТКОМ, так как условия работы последнего не требуют таких перегрузочных значений. В общем случае кратковременные допустимые воздействия по напряжению или перегрузка по напряжению определяются режимами работы устройства, требованиями по координации изоляции и системой защиты от перенапряжений. Современные системы защиты от перенапряжений на основе применения сверхнелинейных резисторов (ОПН) и быстродействующих коммутационных аппаратов, в том числе и твёрдотельных, позволяют свести коэффициент перегрузки по напряжению до 1,4–1,5. Однако так как стоимость системы защиты при снижении требуемого уровня перенапряжений резко увеличивается, то для каждого конкретного вида устройства необходимо координировать параметры преобразователя и системы защиты от

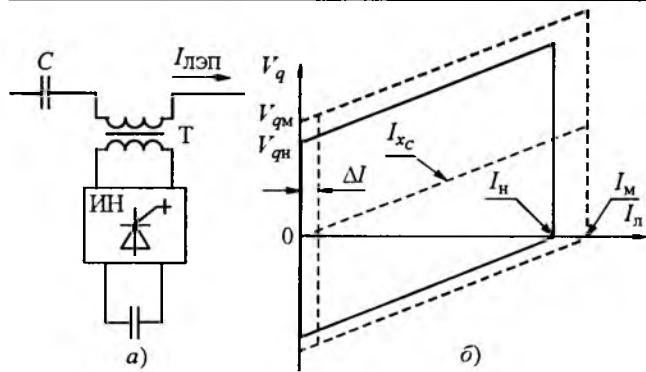


Рис.17. Внешняя характеристика УПК-С и КБ

перенапряжений с точки зрения оптимизации стоимости.

Как и в случае применения шунтовых КУ, различные комбинации УПК-С и нерегулируемых элементов (реакторов, конденсаторных батарей), позволяют изменять внешнюю характеристику и получать область диапазона регулирования, требуемую для конкретного применения, минимизируя общую стоимость УПК. На рис. 17 представлена внешняя характеристика УПК на основе комбинации последовательного включения УПК-С и КБ.

Сравнение характеристик ТУПК и УПК-С показывает, что возможности УПК-С по управлению потоком мощности в ЛЭП, особенно в зоне малых углов  $\delta$ , т.е. для ЛЭП небольшой длины, значительно больше, чем у ТУПК, прежде всего за счёт возможности реверса создаваемой ЭДС. В то же время влияние УПК-С на повышение динамической устойчивости меньше, чем ТУПК, прежде всего из-за меньшей перегрузочной способности. В соответствии со своими внешними характеристиками при больших возмущениях в системе ТУПК работает с максимальной степенью компенсации и максимальными токами перегрузки, в то время как УПК-С, выходя на режим ограничения тока, вынужден уменьшать эквивалентную степень компенсации, что снижает максимум характеристики мощности передачи и условия сохранения динамической устойчивости. В этом случае вид угловой характеристики мощности приобретает вид, показанный на рис.18. Точка перелома характеристики соответствует выходу УПК-С на режим ограничения тока и зависит от мощности устройства.

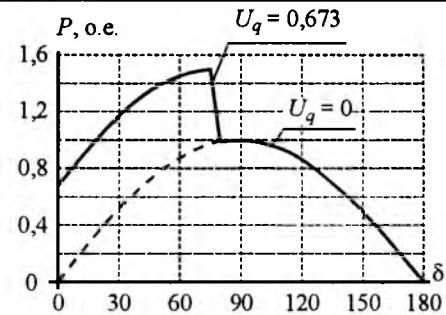
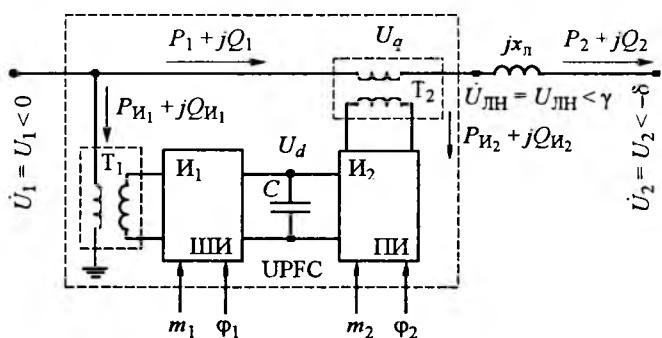


Рис.18. Характеристика мощности ЛЭП с УПК-С при действии ограничения тока



**Рис.19.** Принципиальная схема ОРПМ, включенного в ЛЭП

Наибольшие функциональные возможности из известных устройств FACTS имеет объединенный регулятор потоков мощности (ОРПМ), называемый в зарубежной литературе Unified Power Flow Controller (UPFC). Принципиальная схема ОРПМ показана на рис. 19. ОРПМ состоит из двух преобразователей напряжения, один из которых ( $I_1$ ) является шунтовым (ШИ), а второй ( $I_2$ ) – последовательным (ПИ). Сетевая обмотка ПИ включена последовательно в линию передачи. Преобразователи связаны друг с другом по стороне постоянного тока, что позволяет ПИ работать в режиме SSC и создавать ЭДС, включаемую последовательно в ЛЭП,  $\dot{U}_q = U_q e^{j\phi}$ , управляемую не только по амплитуде, но и по фазе, а ШИ обмениваться с сетью не только реактивной, но и активной мощностью, обеспечивая поддержание заданного напряжения на шинах подключения к системе и напряжение на стороне постоянного тока ОРПМ. Все режимы работы ОРПМ обеспечиваются скоординированным управлением параметров регулирования – глубины модуляции ( $m_1$  и  $m_2$ ) и фаз векторов напряжения

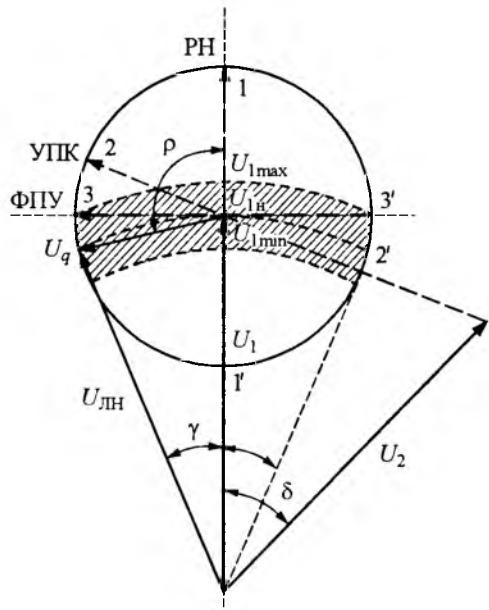


Рис.20. Векторная диаграмма напряжений и токов в ЛЭП с ОРПМ

( $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ) преобразователей ПИ и ШИ. Каждый из преобразователей, входящих в состав ОРПМ, в принципе, может работать независимо от другого, в режиме, когда второй преобразователь отключен, поэтому однозначной внешней характеристики устройства в целом не существует. ОРПМ можно характеризовать двумя отдельными внешними характеристиками ШИ и ПИ, представленными на рис.3,а и 10,б соответственно, но с рядом дополнительных условий, определяющих режим работы ШИ и ПИ с учётом характера обмена мощностью между ними по цепи постоянного тока.

Векторная диаграмма напряжений и токов в ЛЭП с ОРПМ в начале представлена на рис.20.

В соответствии с векторной диаграммой, вектор напряжения в начале ЛЭП ( $U_{\text{ли}}$ ) при изменении напряжения ПИ от 0 до  $U_q$ , в принципе, может находиться в любой точке области, ограниченной окружностью радиуса  $U_q$ , однако из-за ограничений максимальных ( $U_{1\max}$ ) и минимальных ( $U_{1\min}$ ) допустимых значений рабочего напряжения рабочая область положения вектора  $U_q$  ограничивается заштрихованной зоной на рис.20. Естественно, что такие же ограничения существуют и при установке в данной точке любого другого устройства. В частности, на том же рис.20 ось  $1-1'$  соответствует режиму рабо-

ты регулятора напряжения, ось  $2-2'$  – режиму работы УПК (УПК или УПК-С), ось  $3-3'$  – режиму работы фазоповоротного устройства (ФПУ), формирующего вектор напряжения перпендикулярный напряжению  $U_1$ . Как видно из векторной диаграммы, в зависимости от значения напряжения  $U_q$  (соответственно и мощности) для всех устройств требуется вводить ограничения по условиям допустимого уровня рабочего напряжения в точке установки устройства. Однако возможности в части диапазона регулирования значения и фазы вектора напряжения в начале ЛЭП у ОРПМ оказываются больше, следовательно и эффективность применения ОРПМ оказывается выше. Это особенно проявляется при анализе установки ОРПМ в узлах с низкими значениями мощности КЗ, в промежуточных точках ЛЭП с учётом активных составляющих сопротивлений, когда ОРПМ обеспечивает и регулирование значения напряжения в узле и компенсацию продольного падения напряжения на реактивных и активных составляющих реактансов сети и регулирование фазы напряжения.

Угловая характеристика мощности ЛЭП с ОРПМ, включённым в начале ЛЭП, в относительных единицах определяется зависимостью [5]

$$P(\delta) = \sin\delta + U_q \sin(\delta + \rho). \quad (10)$$

Если не учитывать ограничения по напряжению в начале ЛЭП, полная область изменения передаваемой мощности при действии ОРПМ, определяющая диапазон регулирования, ограничивается кривыми 1 и 4 на рис.21. Однако если ввести такие ограничения

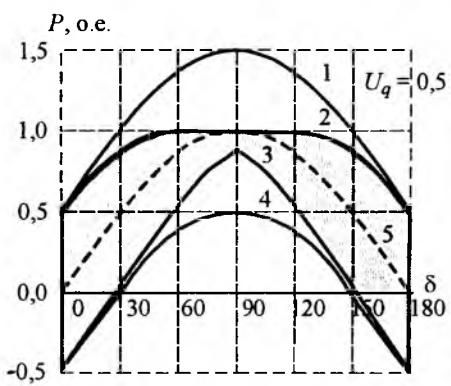


Рис.21. Характеристика мощности передачи с ОРПМ

ния, то, естественно, диапазон регулирования уменьшается. На рис.21 выделена область, ограниченная кривыми 2 и 3, образующаяся при условии поддержания номинального напряжения в начале ЛЭП, т.е. при  $U_{\text{ли}} = U_1 = U_2$  для случая  $U_q = 0,5$ , определяемая зависимостями

$$P(\delta) = \sin(\delta \pm \gamma), \quad (11)$$

где  $0 \leq \gamma \leq \gamma_{\text{max}}$ ;  $\gamma_{\text{max}} = 2 \arcsin \frac{U_q}{2U_1}$ .

Кривая 5 на рис.21 соответствует условию  $U_q = 0$ . Как видно, предел передаваемой мощности по ЛЭП при принятом условии ограничения напряжения оказывается таким же, как и при отсутствии ОРПМ, однако наличие широкой области регулирования приводит к возможности передачи большей мощности при углах, меньших  $90^\circ$ , обеспечивает больший предел по динамической устойчивости ЛЭП с ОРПМ.

Таким образом, внешние характеристики устройств, разработанных для создания гибких (управляемых) ЛЭП, оказывают существенное влияние не только на характеристики передаваемой мощности таких передач, эффективность применения устройств, но

также и на выбор мест установки и мощности самих устройств. При этом необходимо учитывать принципы управления устройствами, обеспечивающие реализацию многофункциональных возможностей, а также режимные ограничения, определяющие допустимые условия работы ЛЭП с новыми типами управляемых устройств.

#### Список литературы

1. Ивакин В.Н., Ковалев В.Д., Худяков В.В. Гибкие электропередачи переменного тока // Электротехника. 1996. № 8.
2. Ивакин В.Н., Ковалев В.Д. Перспективы применения силовой преобразовательной техники в электроэнергетике // Электричество 2001. № 9.
3. Ивакин В.Н., Худяков В.В. Методика расчёта устанавлившихся режимов статических компенсаторов реактивной мощности // Электротехника 1978. № 8.
4. Ивакин В.Н. Исследование характеристик управляемой продольной компенсации как устройства для регулирования потоков мощности гибких линий электропередачи переменного тока // Электротехника. 2003. № 6.
5. Кочкин В.И., Нечаев О.Н. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: НЦ ЭНАС, 2000.

Ивакин Виктор Николаевич – заместитель генерального директора ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук. Окончил МЭИ в 1975 г. В 1987 г. в МЭИ защитил диссертацию по теме "Оптимизация характеристик статических тиристорных компенсаторов".

## Электрическая прочность линейных полимерных изоляторов для линий электропередач высокого и сверхвысокого напряжения

ВОЛКОВА О.В., ГОДУЛЯН В.В., КОРЯВИН А.Р., ОСТАПЕНКО Е.И., ТРИФОНОВ В.З.

Выполнена оценка испытательных напряжений полимерной изоляции ВЛ 110–750 кВ. Предложенные испытательные напряжения линейной полимерной изоляции позволяют обеспечить работоспособность линий ВН и СВН при воздействии грозовых и коммутационных перенапряжений не ниже, чем при ныне используемых стеклянных изоляторах.

На сессии СИГРЭ 2004 г. было отмечено, что основные научно-технические и нормативные проблемы, связанные с созданием линейной полимерной изоляции, успешно

The estimation of test voltage of polymeric isolation of high-voltage lines 110–750 kV is executed. The offered test voltage of linear polymeric isolation allow to provide serviceability of lines of a high and ultrahigh voltage at influence storm and switching voltage is not lower, that at nowadays used glass isolators.

решены. Именно этому наиболее перспективному виду изоляции воздушных линий электропередачи (ВЛ) принадлежит будущее. В нашей стране пока еще не завершен заклю-

чительный этап работы: создание обоснованной отечественной нормативной базы. Заложенные в новой редакции ГОСТ 28856 требования к электрической прочности линейной полимерной изоляции практически полностью совпадают с требованиями ГОСТ 1516.3, нормирующего испытательные напряжения изоляции оборудования подстанций. В результате испытательные напряжения по ГОСТ 28856 оказываются заметно ниже предлагаемых зарубежными производителями. В качестве примера в табл.1 представлены зарубежные ("Sediver" – Франция, "IFO Electric" – Швеция, "Rodurflex" – Германия, NGK – Япония) и отечественные (ВЭИ [1]) данные по испытательным напряжениям полимерных изоляторов, имеющих длины изоляции, близкие к применяемым в России для гирлянд из стеклянных изоляторов на ВЛ 110–750 кВ. Там же для сравнения даны испытательные напряжения, предложенные ГОСТ 28856. При анализе данных табл.1 обращает на себя внимание не только менее жесткие требования ГОСТ 28856 к электрической прочности изоляции, но и тот факт, что зарубежные фирмы для своей продукции предлагают широкий спектр длин изоляторов (соответственно и испытательных напряжений) в рамках одного и того же класса напряжения ВЛ. Предложенный диапазон длин изоляторов перекрывает практически все длины гирлянд стеклянных изоляторов, используемых на отечественных ВЛ 110–750 кВ.

Степень расхождения между заложенными в ГОСТ 28856 испытательными напряжениями и фактическими (опытными) значениями выдерживаемых напряжений  $U_b$  изолято-

ров, выпускаемых рядом отечественных заводов, при стандартном грозовом импульсе положительной полярности иллюстрируют кривые на рисунке. Выдерживаемое напряжение

$$U_b = U_{50}(1 - 1,3\sigma), \quad (1)$$

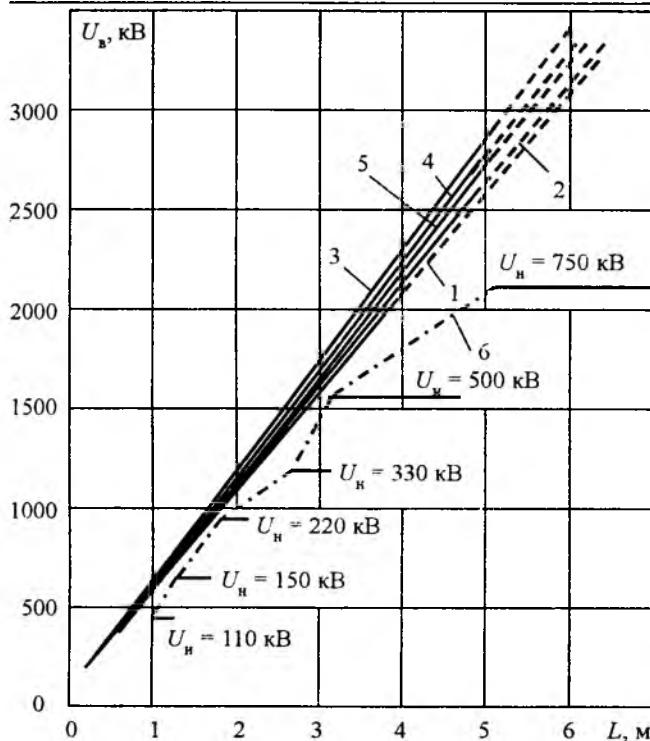
где  $U_{50}$  – 50%-ное разрядное напряжение изоляторов при воздействии грозового импульса положительной полярности;  $\sigma$  – расчётное значение стандартного отклонения, равное 0,03.

Анализ данных табл.1 и рисунка свидетельствует о явно заниженных значениях испытательных напряжений, нормируемых ГОСТ 28856, что делает отечественные изоляторы не только неконкурентоспособными, но и может привести к снижению надёжности ВЛ с полимерными изоляторами и отрицательно сказаться на перспективах их применения. Уже по этим причинам целесообразно пересмотреть нормативную базу ГОСТ 28856 в сторону увеличения испытательных напряжений. Ужесточение требований к электрической прочности полимерной изоляции ВЛ диктуется и необходимостью соблюдения принципов координации линейной и подстанционной изоляции. В первую очередь необходимо учитывать, что изоляционные системы ВЛ состоят из существенно большего, чем на подстанциях, числа параллельно соединенных элементов, что обеспечивает большую степень снижения электрической прочности первой системы по сравнению со второй.

С учётом сказанного, была выполнена оценка испытательных напряжений полимерной изоляции ВЛ 110–750 кВ. При этом принималось во внимание, что возникающие на

Таблица 1

Класс напряжения ВЛ, кВ	Длина изоляции, (мин/сред) см	Испытательные напряжения, кВ							
		Грозовой импульс				Напряжение промышленной частоты (сухое/дождь)			
		Россия	"Sediver"	"IFO"	"Rodurflex"	Россия	"Sediver"	"IFO"	"Rodurflex"
110	102	450	590	595	565	200/200	325/260	365/305	-/290
	114		660	-	-		360/295	-	-
150	127	650	720	755	-	275/275	395/330	455/385	-
	140		795	880	-		440/375	540/455	-
220	178	950	980	1040	950	395/395	545/470	620/530	-
	191		1060	1200	1100		585/505	700/585	-/585
330	267	1175	1430	1650	-	510/-	800/655	950/845	-
	292		1580	1740	-		880/695	990/855	-
500	318	1550	1660	-	-	680/-	925/720	-	-
	381		-	2210	-		-	1170/1095	-
750	508	2100	2500	-	2550	950/-	1395/1035	-	-/1210
	572		-	2980	2990		-	1540/1400	-/1280



Испытательные напряжения грозового импульса для линейных полимерных изоляторов в зависимости от межэлектродного расстояния по данным ВЭИ (1), "Sediver" (2), "IFO Electric" (3), "Rodurflex" (4), NGK (5) и предлагаемые ГОСТ 28856 (6)

подстанциях коммутационные перенапряжения ограничиваются двумя видами защитных аппаратов: ограничителями перенапряжений (ОПН) и вентильными разрядниками (ВР) до двух различных уровней (*а* и *б* соответственно). В табл. 2 приведены принятые в России расчётные уровни коммутационных перенапряжений для изоляции оборудования СВН (330–750 кВ).

Для определения испытательных напряжений коммутационного импульса  $U_{\text{и(к.и)}}$  применительно к линейной изоляции, находящейся в сухом состоянии, использовались известные статистические принципы координации изоляции, разработанные специалистами ПИИПТ и ЛПИ. Испытательные напряжения

$$U_{\text{и(к.и)}} = U_{50(1)}(1 - 1,3\sigma_1), \quad (2)$$

где  $U_{50(1)}$  и  $\sigma_1 = 0,06$  – соответственно 50%-ное разрядное напряжение и расчётное значение стандартного отклонения единичного изоляционного элемента.

Для системы из  $n$  одинаковых параллель-

Вологодская областная универсальная научная библиотека

Таблица 2

Параметр	Класс напряжения сети, кВ			
	330	500	750	
Уровень ограничения коммутационных перенапряжений	<i>а</i>	2,5	2,1	1,9
Испытательные напряжения коммутационного импульса в сухом состоянии, кВ	<i>а</i>	960	1100	1580
Испытательные напряжения коммутационного импульса под дождем / длина гирлянды изоляторов, кВ/см	<i>б</i>	1070	1390	1750
	<i>а</i>	920/268	1050/318	1550*/508
	<i>б</i>	1030/310	1250/394	1710*/568

\* Значения  $U_{\text{и}}$  получены экстраполяцией опытных данных [1].

ных элементов справедливо выражение

$$U_{50(n)} = U_{50(1)}(1 - m\sigma_1). \quad (3)$$

Примем для ВЛ  $n = 5000$ , тогда  $m = 3,6$ .

Поскольку расчётный коэффициент перенапряжений

$$K_{\text{п.р}} = \frac{U_{\text{пп}}}{\sqrt{2} U_{\text{н.р.ф}}},$$

где  $U_{\text{пп}}$  – расчётная амплитуда перенапряжений;  $U_{\text{н.р.ф}}$  – наибольшее рабочее фазное напряжение сети, испытательное напряжение будет определяться выражением

$$U_{\text{и(к.и)}} = K_{\text{п.р}} \frac{\sqrt{2} U_{\text{н.р.ф}} (1 - 1,3\sigma_1)}{(1 - 3,6\sigma_1)} K_{\text{в}}, \quad (4)$$

где  $K_{\text{в}} = 1,1$  – коэффициент, учитывающий снижение разрядного напряжения изоляции при увеличении высоты расположения трассы ВЛ над уровнем моря до 1000 м.

Найденные по (4) значения испытательных напряжений для двух уровней изоляции ВЛ, находящейся в сухом состоянии, представлены в табл. 2.

Линейная изоляция должна выдерживать испытательные напряжения как в сухом состоянии, так и под дождём. Согласно [1] при воздействии коммутационных импульсов отрицательной полярности происходит заметное снижение электрической прочности линейных полимерных изоляторов с защитным покрытием из силаксановой резины. В этом случае экспериментальные значения выдерживаемых напряжений  $U_{\text{в}}$ , найденные с по-

мошью формулы (1), могут быть представлены линейной функцией

$$U_b = U_{i(k.i)} = 215 + 263L, \quad (5)$$

где  $L$  – длина изолятора, м.

Если принять, что уровню ограничения перенапряжений  $a$  соответствует минимальная длина гирлянды изоляторов, используемых на действующих ВЛ 330–750 кВ [2], то с помощью формулы (5) можно определить испытательные напряжения коммутационного импульса линейной изоляции под дождём для двух уровней изоляции ( $a$  и  $b$ ). Найденные таким образом значения испытательных напряжений представлены в табл.2.

Из анализа данных табл.2 следует, что испытательные напряжения изоляции под дождём либо близки к полученным для случая нахождения изоляции в сухом состоянии (изоляция ВЛ 330 и 750 кВ), либо ниже (изоляция ВЛ 500 кВ). При этом, как видно из табл.2, в рамках одного и того же класса напряжения ВЛ длина изоляторов может меняться в довольно широких пределах в зависимости от уровня ограничения перенапряжений.

Учитывая сказанное, а также тот факт, что в сухом состоянии электрическая прочность линейных полимерных изоляторов заметно выше, чем под дождём [1], представляется целесообразным проводить испытания изоляторов ВЛ 330–750 кВ коммутационными импульсами только под дождём.

При воздействии напряжения промышленной частоты дождь также, в основном, негативно влияет на электрическую прочность полимерных изоляторов. Поэтому и в этом случае есть полный смысл ограничиться лишь такими испытаниями. Это подтверждается и практикой многих зарубежных фирм, приводящих данные по одноминутным вы-

держиваемым напряжениям изоляторов только под дождём.

Для выбора испытательных (одноминутных выдерживаемых) напряжений полимерных изоляторов под дождём можно воспользоваться имеющимися экспериментальными данными (см. табл.1), нижняя граница которых задается выражением (действующие значения)

$$U_{b(50\text{ Гц})} = 480L^{0,6} - 195, \quad (6)$$

где  $L$  – длина изолятора, м.

Для ВЛ 110–220 кВ, используя формулу (6) и диапазон изменения длин гирлянд изоляторов (от  $L_{\min}$  до  $L_{\max}$ ) на действующих линиях в рамках одного и того же класса напряжения [2], можно определить одноминутные испытательные напряжения, которые представлены в табл.3.

Для изоляции ВЛ 330–750 кВ также предлагаются два значения испытательных напряжений. Нижний его предел, соответствующий уровню изоляции  $a$ , определяется по формуле (6) с подстановкой в неё минимальной длины изолятора, приведённой в табл.2. Для нахождения верхней границы испытательных напряжений можно воспользоваться принятыми в ГОСТ 1516.3 соотношениями между выдерживаемыми напряжениями для двух уровней изоляции ( $a$  и  $b$ ). Найденные таким образом значения одноминутных испытательных напряжений и соответствующие им длины изоляторов даны в табл.4. Там же приведены амплитудные значения выдерживаемых напряжений промышленной частоты, а также практически совпадающие с ними испытательные напряжения коммутационного импульса под дождём, взятые из табл.2.

Таким образом, для изоляции ВЛ 330–750 кВ предлагается испытания под дождём прово-

Таблица 3

$U_{\text{ном.}}$ , кВ	110			150			220		
$L$ , см	102	114	127	127	140	165	178	191	216
$U_b(50\text{ Гц})$ , кВ (действ.)	290	325	360	360	390	450	480	510	565
$U_{i(50\text{ Гц})}$ , кВ (действ.)	290 – 360			360 – 450			480 – 565		

Таблица 4

$U_{\text{ном.}}$ , кВ	330		500		750	
$L$ , см	267	304	318	381	508	616
$U_{i(50\text{ Гц})}$ , кВ (действ.)	670	740	765	875	1080	1235
$U_{i(50\text{ Гц})}$ , кВ (ампл.)	950	1050	1080	1240	1530	1750
$U_{i(k.i.)}$ , кВ (ампл.)	920	1030	1050	1250	1550	1710

Таблица 5

дить лишь при воздействии коммутационного импульса, а для изоляции ВЛ 110–220 кВ – при напряжении промышленной частоты.

Введение в новый ГОСТ 28856 испытаний коммутационным импульсом полимерной изоляции ВЛ 110–220 кВ с явно заниженными требованиями к её электрической прочности ничем не оправдано, поскольку в этом случае при относительно небольших габаритах изоляции  $U$ -образные зависимости электрической прочности от длительности фронта слабо выражены и, следовательно, объём испытаний можно ограничить грозовыми воздействиями и напряжением промышленной частоты под дождём.

Все нормированные испытательные напряжения различной формы (грозовой и коммутационный импульсы, напряжение промышленной частоты) должны быть скординированы. Испытательные напряжения грозового импульса  $U_{\text{и(г.и)}}$  следует также выбирать для двух уровней изоляции (*а* и *б*) по определенным выше габаритам изоляции и известной зависимости выдерживаемых напряжений от длины изоляторов. Для этого можно использовать выражение

$$U_{\text{в(г.и)}} = U_{\text{и(г.и)}} = 85 + 500L, \quad (7)$$

где  $L$  – длина изолятора, м, являющееся аппроксимацией опытных данных [1] (кривая 1), хорошо согласующихся с экспериментальными результатами фирмы "Sediver" (кривая 2). Выбор нижней границы семейства кривых (рисунок) не случаен, ибо она получена при испытаниях в условиях, максимально приближённых к реальным, когда изоляторы подвешивались к траверсе на относительно коротком тросе. Остальные кривые (3–5) на рисунке построены по результатам испытаний, проведённым по методике Публикации МЭК-383, когда длина троса, связующего траверсу с изолятором, составляла не менее 1 м. Тем самым искусственно завышалась электрическая прочность изоляции.

С помощью выражения (7) с подстановкой в него граничных значений длин изоляторов, найденных при выборе испытательных напряжений промышленной частоты под дождём (для изоляции ВЛ 110–220 кВ) и испытательных напряжений коммутационного импульса под дождём (для изоляции ВЛ 330–750 кВ), были определены испытательные

Номинальное напряжение ВЛ, кВ	Уровень изоляции	Грозовой импульс, кВ	Коммутационный импульс под дождём, кВ	50 Гц (одномоментное) под дождём, кВ (действ.)
110	<i>а</i>	595	–	290
	<i>б</i>	720	–	360
150	<i>а</i>	720	–	360
	<i>б</i>	910	–	450
220	<i>а</i>	975	–	480
	<i>б</i>	1165	–	565
330	<i>а</i>	1425	920	–
	<i>б</i>	1635	1030	–
500	<i>а</i>	1675	1050	–
	<i>б</i>	2055	1250	–
750	<i>а</i>	2625	1550	–
	<i>б</i>	2925	1710	–

напряжения грозового импульса для двух уровней изоляции, которые представлены в табл. 5.

Сформулированные в настоящей работе предложения по нормированию испытательных напряжений линейной полимерной изоляции позволяют обеспечить работоспособность линий ВН и СВН при воздействии грозовых и коммутационных перенапряжений не ниже, чем при ныне используемых стеклянных изоляторах.

#### Список литературы

- Корявин А.Р., Волкова О.В. Импульсная электрическая прочность полимерных линейных изоляторов в сухом состоянии и при дожде // Электротехника. 2001. № 3. С. 13–19.
- РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. СПб.: ПЭИПК, 1999. С. 353.
- Волкова Ольга Владимировна – ведущий научный сотрудник ГУП ВЭИ. Окончила электроэнергетический факультет МЭИ в 1958 г. В 1970 г. защитила кандидатскую диссертацию по исследованию разрядных характеристик защитных воздушных промежутков.
- Годулян Виктор Васильевич – начальник сектора ГУП ВЭИ. Окончил МЭИ в 1967 г. В 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме: "Разработка внешней изоляции электрооборудования постоянного тока в условиях загрязнения и увлажнения".
- Корявин Алексей Родионович – начальник сектора ГУП ВЭИ. Окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1971 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию по исследованию электрического разряда в длинных воздушных промежутках.
- Остапенко Евгений Ильич – директор НПЦ высоковольтной техники ГУП ВЭИ. Окончил Харьковский политехнический институт в 1961 г. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию по технике высоких напряжений.
- Трифонов Виталий Зиновьевич – начальник отдела ГУП ВЭИ. Окончил МЭИ в 1971 г.

# Многообмоточные преобразователи энергии для автономных объектов

ГРАЧЁВ П.Ю., КОСТЫРЕВ М.Л., МЯГКОВ Ф.Н., КУНЦЕВИЧ П.А.

Описаны электромеханические и электромагнитные преобразователи с многообмоточной структурой и вентильным управлением, которые являются основными элементами систем преобразования электроэнергии для автономных объектов. Показано, что такие преобразователи позволяют улучшить гармонический состав и снизить коэффициент искажений выходных напряжений.

В связи с совершенствованием транспортных средств, ветроэлектрических станций и малых ГЭС их системы генерирования существенно изменяются. В транспортных средствах это вызвано, прежде всего, увеличением потребления электроэнергии приёмниками, в частности, бортовым оборудованием транспортных средств [1].

Назрела острая необходимость в создании ветроэнергетических комплексов, в которых ВЭУ, работая совместно с ДЭС, позволяет существенно снизить затраты органического топлива.

Надёжность автономных систем электроснабжения во многом определяется правильным выбором электромеханических и электромагнитных преобразователей, которые являются основными элементами систем преобразования электроэнергии. Выбор того или иного преобразователя зависит от типа источника механической энергии и характера потребляемой электроэнергии в конкретной автономной системе. К потребителям постоянного тока относятся коллекторные и вентильные двигатели постоянного тока, реле и цепи управления и т.п. К ним можно отнести также регулируемые электроприводы переменного тока, автономные инверторы которых подключаются к источникам постоянного тока. Переменным током стабильной частоты питаются сельсины, дистанционные компасы, нерегулируемые асинхронные и синхронные двигатели. Потребителями некритичными к стабильности частоты переменного тока являются электронагревательные приборы и установки.

Например, нагрузки систем жизнеобеспечения, кондиционирования и освещения на

*The article contains description of electromechanical and electromagnetic power converters with multiwinding structure and semiconductor control. It is proved that such power converters permit to improve harmonic contents and reduce distortion of output voltages.*

современных гражданских самолетах по данным [2] составляют от 45 до 55%. Лишь 10–15 % потребителей (по мощности) являются критичными к качеству электроэнергии.

Экономичность систем электроснабжения наземных автономных объектов повышается при работе дизель-генераторных станций (ДГС) совместно с ветроэнергетическими установками (ВЭУ) и накопителями энергии. В таких системах при наличии ветра обеспечивается электроснабжение от ВЭУ, а избыток энергии ВЭУ аккумулируется в накопителе. При отсутствии ветра потребители получают электроэнергию сначала от накопителей (например, аккумуляторных батарей), а затем от ДГС. При этом затраты топлива снижаются, во-первых, за счёт снижения доли нагрузки, которая приходится на ДГС и, во-вторых, за счёт энергии, запасаемой в накопителе.

К источникам электроэнергии автономных объектов предъявляются следующие основные требования: стабильность и точность поддержания параметров электроэнергии (частоты, амплитуды, формы и пофазной симметрии напряжений); высокая надёжность электромеханических и электромагнитных преобразователей энергии, исключающая применение контактно-щёточных и пневмогидравлических узлов; обеспечение возможности электрозапуска первичного двигателя ДВС.

Наиболее простые системы, включающие асинхронные машины с короткозамкнутым ротором и вентильными преобразователями в цепи статорных обмоток, способны обеспечить электроснабжение стационарных наземных автономных объектов, а также бортовые

сети движущихся автономных объектов постоянным током и переменным током нестабильной частоты. От накопителя электроэнергии возможен запуск маршевого двигателя транспортного средства или, например в ВЭУ с ротором Дарье, предварительная раскрутка ветроколеса. При этом вентильные преобразователи целесообразно выполнять по схемам автономных инверторов напряжения.

Учитывая, что в дальнейшем в автономных объектах будет расти доля потребителей постоянного тока, при сохранении значительной части потребителей переменного тока, не критичных к стабильной частоте [4], для обеспечения потребителей электроэнергией переменного тока стабильной частоты высокого качества в автономных системах электроснабжения целесообразно использовать преобразованную электроэнергию звена постоянного тока.

Блок-схема системы, разработанной авторами статьи, со звеном постоянного тока, включающая асинхронную машину с двумя обмотками на статоре и трансформатор с двумя первичными обмотками, показана на рис.1. Достоинство системы в том, что снижается установленная мощность преобразователя стабильной частоты в соответствии с мощностью потребителей стабильной частоты при этом удается получить напряжение,

близкое к синусоидальному без использования ШИМ. Рассмотрим работу и основные блоки системы.

В асинхронном генераторе механическая мощность с вала ветроколеса или маршевого двигателя преобразовывается в энергию переменного тока изменяемой частоты. Нагрузки, не критичные к стабильности питающего напряжения, подключаются к выходной обмотке генератора. Вентильные преобразователи ВП1 и ВП2 являются для него источниками реактивной мощности и выпрямителями для питания нагрузок постоянного тока и заряда аккумуляторной батареи.

Для питания нагрузок, критичных к частоте питающего напряжения, служит трансформаторно-инверторный преобразователь (ТИП). Он содержит многообмоточный трансформатор с вращающимся магнитным полем, которое создается токами ВП3 и ВП4. К его выходной обмотке подключаются нагрузки стабильной частоты.

В режиме запуска маршевого двигателя транспортного средства или предварительной раскрутки ветроколеса ВЭС используется энергия аккумуляторной батареи. Вентильные преобразователи ВП1 и ВП2 формируют из постоянного напряжения аккумуляторной батареи трёхфазные переменные напряжения изменяемой частоты. Нагрузки посто-

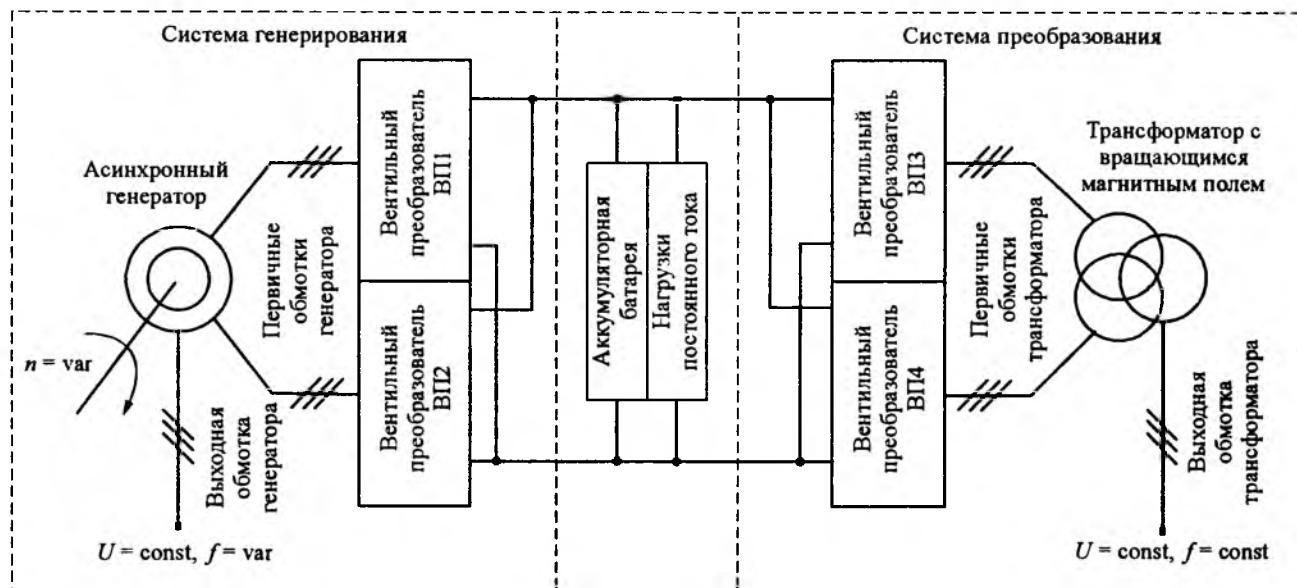


Рис.1. Функциональная схема системы с преобразователями электроэнергии с многообмоточной структурой

янного тока и переменного тока стабильной частоты в этом режиме потребляют электроэнергию без перерыва.

В ветроэнергетике преимущество использования преобразованной электроэнергии звена постоянного тока заключается в возможности параллельной работы нескольких ВЭС с ДГС, унификации узлов ВДС за счёт применения стандартных ВЭС, перехода без отключений электроснабжения потребителей от ДГС к электроснабжению потребителей от ВЭС и наоборот.

В системах электроснабжения автономных объектов предъявляются жёсткие требования к массогабаритным показателям, уровню излучения электромагнитных помех. Трансформаторы с вращающимся магнитным полем в сравнении со стержневыми трансформаторами не содержат ярем. Исключение из конструкции ярем снижает удельную массу трансформатора на 40–50% [5]. Обмотки трансформатора с вращающимся магнитным полем расположены в пазах внутри магнитопровода, поэтому имеют ограниченный уровень электромагнитного излучения.

Описанная система преобразования электроэнергии соответствует тенденциям развития систем генерирования электроэнергии для автономных объектов, в которых лишь часть полной мощности преобразуется статическими преобразователями. В системе генерирования и преобразования ВП1 и ВП2 преобразуют 10–15% номинальной активной мощности многообмоточного вентильного генератора.

При постоянстве частоты вращения теплового двигателя транспортного средства и наличии на борту мощных систем противообледенения, отопления асинхронных двигателей, не критичных к точности поддержания частоты, целесообразно использование в автономной системе многообмоточного асинхронного вентильного стартёр-генератора без ТИП. В этом случае масса вентильных преобразователей уменьшается и появляется возможность подключения всех нагрузок переменного тока к выходной обмотке генератора.

Для применения трансформаторно-инверторных преобразователей в системах генерирования и преобразования автономных объектов необходимо ограничить в их выходном

напряжении содержание высших гармонических составляющих на уровне 8%. Наличие ключевых элементов в цепи трёхфазных первичных обмоток приводит к ухудшению гармонических составов выходных напряжений. Установка электрических фильтров для сглаживания ступеней выходного напряжения увеличивает массу и объём системы, применение ШИМ вызывает перенапряжения, что ограничивает применение этих систем в автономных источниках электроэнергии.

При увеличении числа трёхфазных обмоток на статоре асинхронной машины снижается коэффициент искажений напряжений на выходной, специальным образом расположенной обмотке [6]. Кроме этого уменьшаются пульсации в звене постоянного тока и пульсации электромагнитного момента. Снижаются действующие значения фазных токов – уменьшаются установленные мощности элементов вентильных преобразователей. Увеличение числа обмоток уменьшает объём фильтра в звене постоянного тока вентильных преобразователей. При увеличении числа фаз с трёх до шести энергоёмкость конденсатора фильтра уменьшается в 2 раза, объём – в 1,6 раза, а масса – в 1,3 раза.

Рассмотрим возможности получения близких к синусоидальным выходных напряжений в системах, управляемых вентилями с многообмоточными электромеханическими (ЭМХ) и электромагнитными (ЭМГ) преобразователями.

Формирование симметричного выходного напряжения при питании трёхфазных первичных обмоток многообмоточных ЭМХ и ЭМГ преобразователей симметричной системой ступенчатых напряжений возможно, если пространственный сдвиг одноименных фаз первичных обмоток и соответствующий ему временной сдвиг кратен половине интервала дискретности работы вентильных преобразователей (половине длительности ступеней напряжений). В этом случае ступени напряжения выходной обмотки имеют одинаковую длительность.

Для получения выходных напряжений с симметричными ступенями необходимо, чтобы пространственный сдвиг одноименных фаз первичных и выходной обмотки был кратен четвёртой части интервала дискретнос-

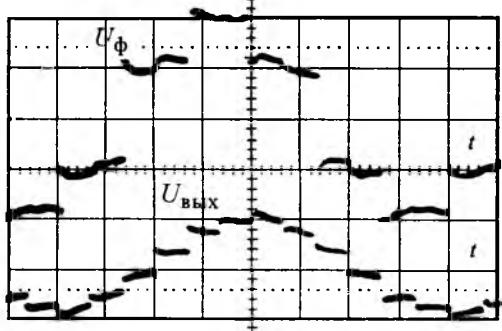


Рис.2. Напряжения многообмоточной машины при управлении вентильными преобразователями по  $180^\circ$  закону управления ( $U_\Phi$  – фазное напряжение входных обмоток;  $U_{\text{вых}}$  – напряжение выходной обмотки)

ти работы вентильных преобразователей. Если пространственный или временной сдвиг не кратны половине интервала дискретности, то невозможно обеспечить симметрию выходных напряжений фаз.

В результате экспериментальных исследований многообмоточных преобразователей на макетных образцах и математических моделях авторами предложен многообмоточный источник электропитания с двумя вентильными преобразователями [7]. Особенности построения математических моделей многообмоточных электромеханических и электромагнитных преобразователей с учётом дискретности переключений вентилей описаны в [8].

На рис.2 представлены осциллограммы напряжений при управлении вентильными преобразователями по  $180^\circ$ -градусному закону. При этом в фазном напряжении первичных обмоток имеется шесть ступеней за период основной частоты. В фазном напряжении первичных обмоток содержится 20% 5-й гармоники, 14,3% 7-й гармоники, 9,1% 11-й гармоники, 7,7% 13-й, а коэффициент искажений составляет 31,5%. В фазном напряжении выходной обмотки отсутствуют 5- и 7-я гармоники, а содержатся 11- и 13-я, которые составляют 9,1 и 7,7% соответственно. Коэффициент искажений 15,2%. При таком управлении в режимах небольших и средних нагрузок действующие значения фазных токов велики из-за значительного отличия их формы от синусоидальной.

Для снижения действующих значений фазных токов авторами предложен способ управ-

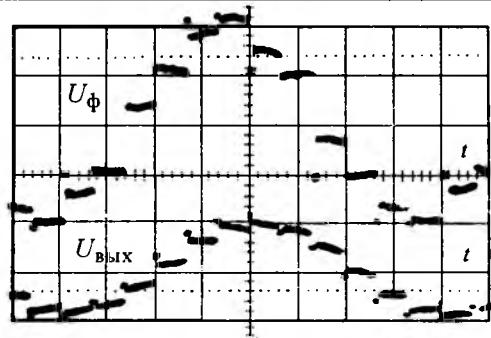


Рис.3. Напряжения многообмоточной машины при управлении вентильными преобразователями предложенным способом

ленияя вентильной электрической машиной [9], при котором вентили преобразователей переключаются по закону, подобному  $150^\circ$ -градусному. На рис.3 представлены осциллограммы напряжений для этого случая. При управлении по этому способу форма напряжения выходной обмотки изменяется незначительно. В описанных системах для получения выходных напряжений, соответствующих требованиям ГОСТ 19705-89, необходима установка электрических фильтров.

Лучший, чем в описанных случаях, коэффициент искажения напряжения на выходной обмотке имеет исследованный авторами ЭМГ преобразователь на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем. В отличие от рассмотренных выше первичные обмотки этого преобразователя сдвинуты в пространстве на  $15^\circ$ , а фазное напряжение преобразователей имеет 12-ступенчатую форму напряжения.

На рис.4 приведены экспериментальные

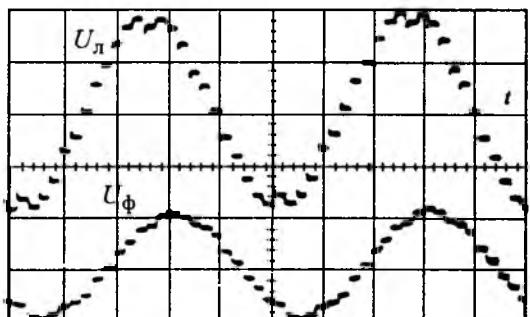


Рис.4. Напряжения многообмоточного трансформатора с вращающимся магнитным полем при сдвиге вторичной обмотки относительно первичных на  $75^\circ$  ( $U_\Phi$  – фазное напряжение входных обмоток;  $U_L$  – линейное напряжение выходной обмотки)

осциллограммы линейного и фазного напряжений на выходной обмотке такого преобразователя. Одноименные фазы первичных и выходной обмоток располагались симметрично со сдвигом  $7,5^\circ$ . В фазном напряжении выходной обмотки двадцать четыре ступени за период основной частоты. Ступени расположены по закону, близкому к синусоидальному. Гармонический анализ кривой выходного напряжения показал, что пятая гармоническая составляющая в 24 раза меньше первой, а седьмая – в 52 раза. Другие высшие гармонические составляющие незначительны. Коэффициент искажений составляет в этом случае, при идеальной форме ступенчатых фазных напряжений, 7,8%.

Эксперименты показали, что существует шесть положений внутреннего магнитопровода трансформатора с вращающимся магнитным полем, в которых в выходной обмотке индуцируется ЭДС, соответствующая рис.4 и 5. На рис.5 показана ЭДС выходной обмотки при сдвиге этой обмотки относительно первичных на  $37,5^\circ$ . Несмотря на приблизительно одинаковый гармонический состав и коэффициент искажений различие между кривыми состоит в соотношении максимальных значений и первых гармонических составляющих.

Для улучшения жёсткости внешней характеристики системы преобразования предпочтителен сдвиг её выходной обмотки на  $37,5^\circ$ . В режиме нагрузки форма выходного напряжения такого ЭМГ преобразователя приближается к синусоидальной. Кривые напряжений приобретают плавные переходы от ступени к ступени.

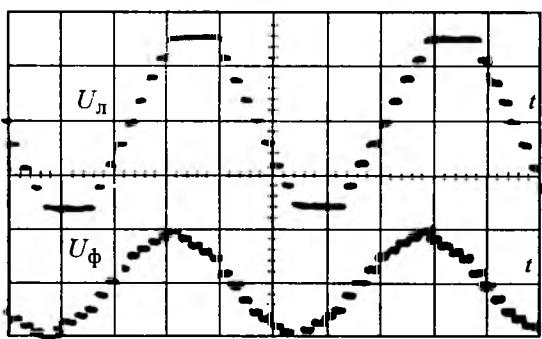


Рис.5. Напряжения многообмоточного трансформатора с вращающимся магнитным полем при сдвиге вторичной обмотки, относительно первой первичной обмотки на  $37,5^\circ$

Регулирование выходного напряжения в пределах 10–12 % возможно с применением предложенного авторами способа [10], в соответствии с которым увеличивают первую гармоническую составляющую уменьшением времени проводимости дополнительных ключей и соответствующим повышением времени проводимости основных ключей. Для снижения первой гармонической увеличивают время проводимости дополнительных ключей и уменьшают время проводимости основных ключей.

### Выводы

1. В многообмоточных преобразователях энергии со сдвигом первичных обмоток  $30^\circ$  предложенное авторами управление вентильными преобразователями позволяет существенно уменьшить действующие значения фазных токов в режиме небольших нагрузок. В таких преобразователях для снижения коэффициента искажений выходного напряжения необходимы электрические фильтры.

2. Многообмоточные преобразователи со сдвигом первичных обмоток кратным  $15^\circ$  и при 12-ступенчатой форме напряжений на фазах первичных обмоток позволяют получить напряжение на выходе, соответствующее требованиям ГОСТ 19705-89, без применения ШИМ и фильтров, а также в небольших пределах изменять амплитуду этого напряжения.

### Список литературы

1. All electric aircraft // Power Eng. 2003. Vol. 17, №4. P. 35–37.
2. Ratcliffe J.P. The system approach to airborne electrical power supplies // Aeronautic J. 1977. Vol. 81, № 801. P.388–398.
3. Vessart V.V. Provision of optimal operation mode of wind-diesel systems in power supply by of autonomous units // Сб. тезисов и статей 4-го Междунар. экологического Форума стран балтийского региона "Экобалтия 2002". СПб.: ГПУ, 2002. С. 89–91.
4. Mendi I.S. Will power-by-wire replace power by hydraulics // NAECON'81. P.221–228.
5. Кузнецов Н.Е. Машинно-вентильные комплексы // Тезисы докладов науч.-техн. конференции Электротехнические комплексы автономных объектов (ЭКАО– 97). М., 1997. С. 21–22.
6. Бронов С.А., Овсянников В.И., Соустин Б.П. Регулируемые электроприводы переменного тока. Екатеринбург: Изд-во УПИ, 1998.
7. А.с. 1473068 СССР. Источник электропитания / П.Ю. Грачев, А.А. Дружков, Ф.Н. Мягков и др. // Открытия. Изобретения. 1988. №22.
8. Грачев П.Ю. Особенности режимов работы и мате-

матического моделирования электромеханических и электромагнитных преобразователей с несколькими вентильными преобразователями с использованием тригонометрических и экспоненциальных функций дискретного аргумента // Труды 5-го международного симпозиума ЭЛМАШ-2004 "Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования". Т. 2. 2004. С. 162–166.

9. А.с. 1568192 СССР. Способ управления вентильной электрической машиной / П.Ю. Грачев, М.Л. Костырев, Ф.Н. Мягков. // Открытия. Изобретения. 1990. №20.

10. А.с. 1821884 СССР. Способ формирования выходного напряжения преобразователя электроэнергии / П.Ю. Грачев, М.Л. Костырев, Ф.Н. Мягков и др. // Открытия. Изобретения. 1993. №22.

**Грачёв Павел Юрьевич** – доцент Самарского ГТУ, канд. техн. наук. Окончил электротехнический факультет Куйбышевского политехнического института в 1971 г. В 1977 г. защитил диссертацию по теме "Исследование асинхронного вентильного генератора, управляемого введением ЭДС в цепь фазного ротора".

**Костырев Михаил Леонидович** – профессор Самарского ГТУ, доктор техн. наук. Окончил электротехнический факультет Тольяттинского политехнического института в 1961 г. В 1985 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Асинхронные генераторы с вентильным возбуждением для автономных объектов".

**Мягков Ф.Н.** – доцент Самарского ГТУ, канд. техн. наук. Окончил электротехнический факультет Куйбышевского политехнического института в 1964 г. В 1990 г. защитил диссертацию по теме "Многообмоточные электрические машины с вентильными преобразователями в автономной системе электроснабжения".

**Кунцевич Пётр Антонович** – работает в корпорации "Единый электроэнергетический комплекс", канд. техн. наук. Окончил электротехнический факультет Тольяттинского политехнического института в 1963 г. В 1989 г. защитил диссертацию по теме "Асинхронный резонансный генератор как автоперестраивающаяся автоколебательная система".

## Средства улучшения качества электрической энергии на сельскохозяйственных предприятиях

ЛИТОВКИН Г.И., ОРЛОВ А.И., ТРЕТЬЯКОВ А.Н.

Приводятся результаты компьютерного моделирования трёхфазного активного электрического фильтра на основе анализа существующих средств компенсации высших гармоник. Рассмотрено влияние промышленных предприятий на сельскохозяйственных потребителей.

Показатели качества электрической энергии в сетях общего назначения нормируются по: установившемуся отклонению напряжения; коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения; коэффициенту несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности. Проведённый анализ качества электрической энергии на сельскохозяйственных предприятиях Иркутской области показал, что в электрических сетях энергоснабжения многих хозяйств наблюдается отклонение от норм, включая и коэффициент *n*-й гармонической составляющей напряжения [1, 2].

В настоящее время многие хозяйства области оснащаются новейшим технологиче-

*The results of three-phase active filter computer design are given on the basis of the real means of higher harmonics compensation. The industrial enterprises influence on rural users were considered.*

ким оборудованием с повышенными требованиями к качеству электроэнергии. Незначительное отклонение значений показателей качества электроэнергии за пределы допуска приводит к сбою в работе технологических линий, а также остановке процессов производства сельскохозяйственной продукции. Согласно последним данным в Иркутской области доля энергопотребления сельскохозяйственными предприятиями составляет 3,1% общего энергопотребления [3]. Основными потребителями электроэнергии являются промышленные предприятия области, которые вносят наибольший вклад в ухудшение качества электрической энергии. Поэтому техническая задача по снижению влияния

высших гармонических составляющих напряжения и улучшения качества электрической энергии достаточно актуальна.

Простейшие способы улучшения качества электрической энергии основаны на компенсации реактивной мощности пассивными фильтрами (конденсаторными установками и реакторами). Они позволяют повысить коэффициент мощности и улучшить пропускную способность сети. Данные устройства в основном применяются на крупных промышленных объектах с достаточно постоянной потребляемой мощностью [4].

Пассивные фильтры имеют и ряд недостатков: возможность перекомпенсации при мощности потребителя ниже установленной и недокомпенсации при увеличении потребляемой мощности выше номинального значения, сравнительно высокая стоимость, большая потребляемая мощность, а также высокие массогабаритные показатели и низкая добротность.

Помимо пассивных фильтров широкое применение в качестве компенсатора реактивной мощности нашли активные (управляемые) фильтры [5, 6]. Системы управления активных фильтров позволяют отслеживать изменения, происходящие в энергетической системе в реальном временном масштабе. В таких фильтрах осуществляется компенсация высших гармонических составляющих с одновременной компенсацией реактивной мощности без перерегулирования.

В настоящей работе анализируются две структурные схемы трёхфазного активного фильтра, обеспечивающего компенсацию гармонических составляющих и снижение влияния нелинейных потребителей промышленных предприятий на работу сельскохозяйственных потребителей. За последнее десятилетие на основе современных технологий расширилась элементная база силовых устройств (GTO-тиристоры, IGBT и MOSFET-транзисторы), что стимулирует дальнейшее совершенствование активных фильтров [7].

Прослеживается тенденция перехода от методов физического моделирования к математическому моделированию. Существует достаточно большое число прикладных программ (Electronics Workbench, Multisim, Orcad, Protel DXP и т.д.), позволяющих с достаточной точ-

ностью осуществить моделирование работы отдельных узлов активного фильтра, а в некоторых случаях – и всей системы в целом [8]. Общий анализ активного трёхфазного электрического фильтра при наличии внешних возмущений и вариации параметров фильтра представляет нетривиальную задачу. В связи с этим было проведено программное моделирование нескольких типов фильтров с учётом работы отдельных блоков. В качестве пакета прикладных программ была выбрана программа моделирования Electronics Workbench 5.12 Professional German, позволяющая выполнять графический ввод проектируемой схемы и анализ характеристик аналоговых и цифровых устройств. При моделировании активного фильтра, обеспечивающего компенсацию высших гармоник напряжения необходимо учитывать подверженность влиянию нелинейной нагрузки промышленных предприятий. Активный фильтр должен удовлетворять следующим требованиям: высокая добротность, работа в широком диапазоне температур, сниженные массогабаритные показатели и эксплуатация без обслуживающего персонала. Учитывая эти требования и экспериментальные данные качества электроэнергии для сетей 0,4 кВ в Иркутской области, проведено моделирование трёхфазного активного фильтра.

На первом этапе рассматривалась схема фильтра с двойным Т-мостом, показанная на рис. 1.

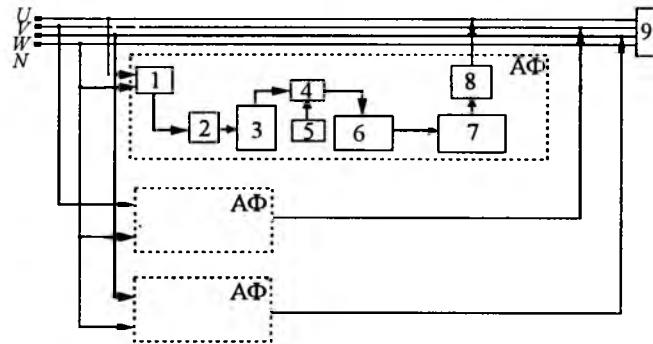


Рис.1. Структурная схема трёхфазного активного фильтра с двойным Т-мостом:

1 – делители напряжения; 2 – частотные фильтры; 3 – фазосдвигающие устройства; 4 – интегральные прерыватели; 5 – мультивибраторы; 6 – дифференциальные усилители; 7 – силовые модули; 8 – LC-фильтры; 9 – нагрузка

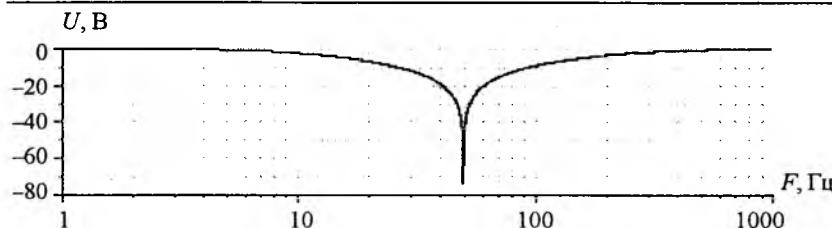


Рис.2. Частотная характеристика режекторного фильтра

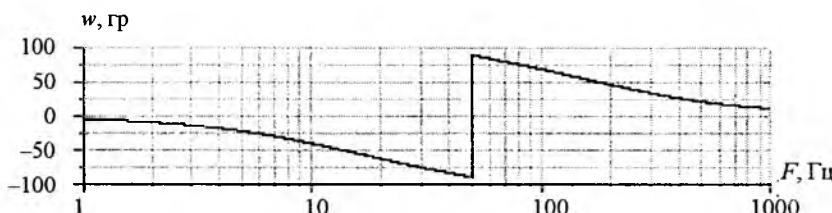


Рис.3. Фазо-частотная характеристика режекторного фильтра

В схеме используется режекторный фильтр на основе двойного Т-моста, в котором происходит подавление первой гармоники напряжения, а на выходе фильтра получается сигнал ошибки. По сравнению с первым вариантом данная схема проще в реализации. Несмотря на это возникли особенности, обусловленные применением двойного Т-моста. Частотный фильтр является высокодобротным устройством и, как следствие этого, имеет неудовлетворительную импульсную характеристику, а его АЧХ имеет естественный завал (вторая гармоника ослабляется на 8 дБ, третья – на 3 дБ и т.д.), что показано на рис.2.

Кроме того, время запаздывания для каждой гармоники различно, что требует применения дополнительного блока коррекции сигнала ошибки как по амплитуде, так и по фазе (рис.3).

Сигнал ошибки некорректно отрабатывается, что в итоге делает данную схему малопригодной к использованию в связи с низкой добротностью активного фильтра.

В результате проведённого анализа предлагается следующая схема трёхфазного активного фильтра, которая показана на рис.4 [9].

Трёхфазный активный электрический фильтр состоит из систем преобразования входной информации 1, сумматоров 2, синхронизированной с сетью системы формирования эталонного сигнала 3, широтно-импульсных модуляторов (ШИМ) 4, буферных кас-

кадов 5, импульсных усилителей мощности 6, LC-фильтров 7, мощной нелинейной нагрузки 8.

В процессе моделирования в качестве генераторов гармонических составляющих напряжения были использованы генераторы различных гармоник напряжения, соединённые вместе. Моделирование осуществлялось с использованием 11 гармоник (100 Гц, 180°; 150 Гц, 270°; 250 Гц, 135°; 350 Гц, 20°; 450 Гц, 210°; 550 Гц, 145°; 650 Гц, 170°; 750 Гц, 35°; 850 Гц, 135°; 950 Гц, 95°; 1050 Гц, 315°), наложенных на основную (первую) гармонику. Таким образом, модель электрической сети представляет собой

основной сигнал напряжения, действующее значение которого 220 В, а частота 50 Гц, с наложенными на него гармониками напряжения. Модель трёхфазной электрической сети максимально приближена к реальной.

Сигнал ошибки получен как разность между сигналом сети и эталонным сигналом, привязанным по фазе и частоте к напряжению сети. Результат моделирования представлен на рис.5. Компенсация высших гармоник происходит при суммировании сетевого сигнала и сигнала ошибки, поданного в противофазе.

До включения активного фильтра кривая тока в нагрузке имела искажённую форму. После включения фильтра ( $t_{вкл}$ ) происходит компенсация высших гармоник, форма тока в сети становится синусоидальной.

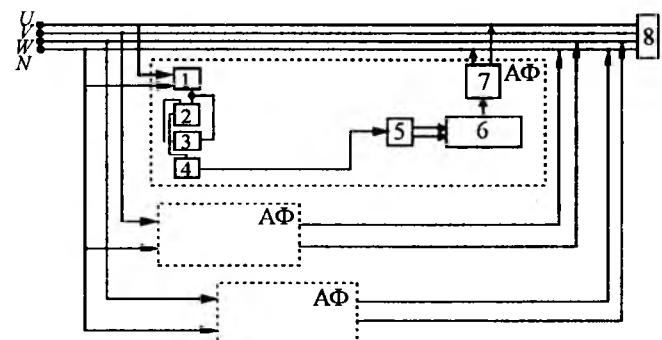


Рис.4. Структурная схема трёхфазного активного электрического фильтра, выполненного на аналого-цифровой базе

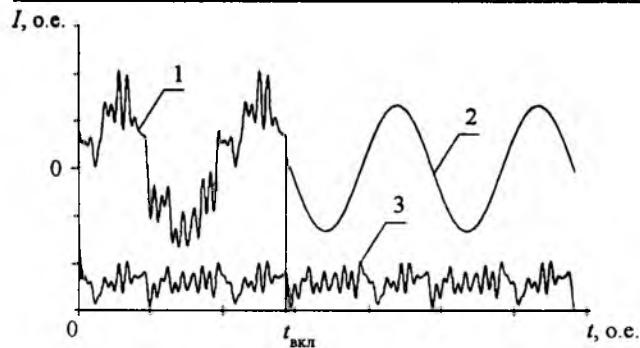


Рис.5. Форма кривой тока в нагрузке:

1 – форма тока в сети до включения фильтра; 2 – форма тока в сети после включения фильтра; 3 – сигнал ошибки

В схеме за счёт применения блоков управления на базе аналого-цифровых электронных схем достигается довольно точная следящая система.

В настоящее время активные фильтры в большинстве случаев создаются с применением цифровой электроники или так называемых однокристальных ЭВМ, т.е. от аналоговых схем переходят к цифровым [10, 11].

Таким образом, предложенный трёхфазный активный электрический фильтр наиболее приемлем для реализации как по техническим показателям, так и по снижению влияния нелинейной нагрузки промышленных потребителей на работу предприятий АПК, т.е. снижения высших гармонических составляющих напряжения.

#### Список литературы

- ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Издательство стандартов, 1998.
- Третьяков А.Н., Кудряшев Г.С., Кюн В.А. Вопросы качества энергии на сельскохозяйственных предприятиях Иркутской области // АГТУ "Ползуновский альманах". 2004. №1. С.170–174.
- Бузунова М.Ю., Кудряшев Г.С., Кюн В.А. и др. Вопросы энергосбережения АПК Иркутской области //

Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 4-й международной научно-практической конференции (12-13 мая 2004 г., г. Москва, ГНУ ВИЭСХ). Ч. 1. Проблемы энергообеспечения и энергосбережения. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2004. С.155–159.

4. Дементьев Ю.А., Кочкин В.И., Мельников А.Г. Применение управляемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях // Электричество. 2003. №9. С.2–10.

5. Остриров В.Н., Мосин Р.В. Экспериментальные исследования трёхфазного активного фильтра для применения в современных электронных преобразователях // Электричество. 2003. №7. С.63–66.

6. Агунов А.В. Статический компенсатор неактивной составляющей мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки // Электротехника. 2003. №2. С.47–50.

7. Кошев Л.А., Шлайфштейн В.А. Характеристики и области применения устройств с использованием преобразователей напряжения в системах электропередачи // Электричество. 2003. №8. С.2–10.

8. Агунов А.В. Компьютерное моделирование активной фильтрации напряжения // Электричество. 2003. №6. С.2–6.

9. Пат. на полезную модель 4272. Трёхфазный активный электрический фильтр / Третьяков А.Н., Кудряшев Г.С., Орлов А.И., Савуляк В.Н. 2004.

10. Пат. 2187873 РФ Н02 J 3/18. Компенсатор реактивной мощности / Шадский Г.Н., Сальников В.С., Котенев С.В. и др. // Открытия. Изобретения. 2002. № 8.

11. Пат. 2121222 РФ Н04 В 3/53. Трёхфазный активный электрический фильтр / Белов В.Ф., Матягин С.А. // Открытия. Изобретения. 1998. № 10.

**Литовкин Геннадий Иосифович** – главный специалист (по радиопередающим устройствам) Института солнечно-земной физики СО РАН. Окончил в 1964 г. факультет радиосвязи и радиовещания Новосибирского электротехнического института связи.

**Орлов Андрей Игоревич** – ведущий инженер Института солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН). Окончил в 1988 г. физический факультет Иркутского государственного университета им. А.А. Жданова, специальность "Космофизика".

**Третьяков Александр Николаевич** – аспирант кафедры электротехники и автоматизации сельскохозяйственного производства. Окончил в 2002 г. энергетический факультет Иркутской Государственной сельскохозяйственной академии, специальность "Электрификация и автоматизация сельского хозяйства".

# Мостовой инвертор с переключающими нелинейными дросселями и одним полупроводниковым ключом

ДИЗЕНДОРФ Э.А.

Описаны результаты разработки и исследования мостового инвертора с нелинейными дросселями в качестве переключающих приборов и одним силовым полупроводниковым ключом. Представлены схемы инверторов и блоков управления полупроводниковым ключом в зависимости от типа ключа: транзисторного или тиристорного. Даны рекомендации по запуску инвертора, объяснен механизм регулировки выходного напряжения.

В настоящее время полупроводниковые преобразователи различного типа широко применяют в промышленности для различных целей: электротермии, электропривода, питания высоковольтных железнодорожных сетей и т.д. В основном используют классические схемы – мостовую и полумостовую.

Применение встречно-параллельного соединения управляемых и не управляемых вентилей значительно повысило надёжность полупроводниковых преобразователей, в то же время вдвое увеличило число вентилей, следовательно, возросли масса, габариты и цена инверторов.

За последние несколько десятилетий совершенствование преобразовательной техники шло несколькими путями:

1. Смена ионных вентилей полупроводниковыми – однооперационными тиристорами, затем появились запираемые тиристоры и мощные транзисторы. Качество полупроводниковых приборов непрерывно улучшалось. Например, сейчас наложен выпуск тиристоров, коммутирующих ток до 4 кА, с возможностью блокировать напряжение до 6 кВ, но чем выше блокирующая способность тиристора, тем ниже его рабочая частота и больше тепловые потери [1].

2. Создание более точных и подробных расчётов электромагнитных процессов, происходящих в инверторах, а также методик простых инженерных расчётов с приемлемой точностью.

3. Улучшение качества управления преобразователями – непрерывное усовершенство-

Here are presented results of development and study of a bridge inverter with non-linear chokes as switching devices and one semiconductor power switch. The schemes of the invertors and control blocks for the semiconductor switch (both for transistor and thyristor type) are given. The recommendations how to start the inverter are given, the mechanism of adjustment of the out put voltage is explained.

вание элементной базы электроники позволяет сделать это.

А вот новинок в силовой преобразовательной схемотехнике, существенно улучшающих параметры преобразователей, не было, если не считать индуктивно-ионного преобразователя Слухоцкого А.Е. [2], выполненного в варианте макета, в котором анодная группа вентилей заменена обычными линейными дросселями, что значительно улучшило некоторые параметры преобразователя.

Инвертор, представленный в настоящей статье, продолжает тему индуктивных преобразователей, выдвинутую Слухоцким А.Е., но в более усовершенствованном виде: применение нелинейных индуктивностей наделило инвертор новыми свойствами и позволило выполнить мостовой резонансный инвертор [3, рис.3] на четырёх нелинейных индуктивностях с одним силовым полупроводниковым ключом. При таком выполнении инвертора (правильно спроектированные и изготовленные нелинейные дроссели) повышается надёжность инвертора, появляется возможность работать с более высоким входным напряжением  $U_d$  (несколько десятков киловольт), так как скомпоновать один высоковольтный ключ проще, чем четыре плеча мостового инвертора, и уменьшить габариты, поскольку сделать высоковольтный дроссель небольших размеров не так уж сложно. Применяя в качестве силового ключа тиристор, можно не опасаться аварийных токов при срыве инвертирования, если аварийный ток не превышает ударного тока тиристора.

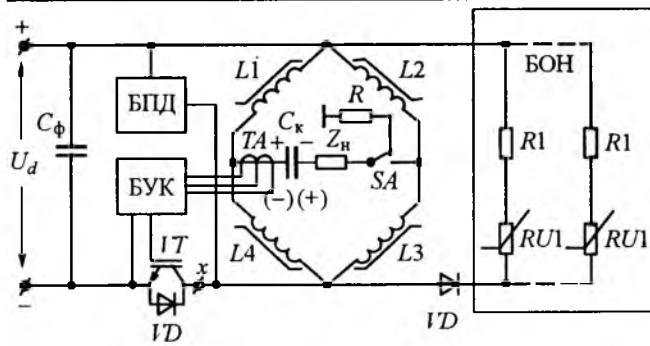


Рис.1. Схема инвертора с транзисторным силовым ключом

Цель настоящей статьи – ознакомить специалистов, интересующихся проблемами преобразовательной техники, с резонансным мостовым инвертором, мост которого полностью выполнен на нелинейных дросселях, с одним полупроводниковым силовым ключом. В первую очередь рассмотрим инвертор с транзисторным ключом, так как он проще.

Инвертор (рис.1) содержит четыре нелинейных дросселя  $L1-L4$ , полупроводниковый транзисторный ключ  $VT$ , нагрузку  $Z_h$ , переключатель  $SA$ , заряжающий резистор  $R$ , коммутирующий конденсатор  $C_k$ , блок управления ключом  $БУК$ , блок подмагничивания дросселей  $БПД$ , блок ограничения напряжения на полупроводниковом ключе  $БОН$ , трансформатор тока  $TA$ , диод  $VD$ .

При подаче входного напряжения  $U_d$  на инвертор конденсатор  $C_k$ , соединённый с общей шиной через переключатель  $SA$  и заряжающий резистор  $R$ , заряжается до напряжения  $U_d$  с полярностью, указанной на рис.1 без скобок. При включении инвертора в работу переключатель  $SA$  отсоединяет конденсатор  $C_k$  от резистора  $R$  и соединяет его с другой точкой диагонали переменного тока моста, составленного из дросселей  $L1-L4$ . Поэтому по внутренним контурам  $C_k-L1-L2-Z_h-C_k$  и  $C_k-L4-L3-Z_h-C_k$  потекут токи, намагничивая сердечники дросселей  $L2$  и  $L4$  в прямом направлении, а сердечники дросселей  $L1$  и  $L3$  – в обратном. Здесь за прямое направление вектора индукции сердечников считаем то направление, которое возникает при рабочем токе через ключ, т.е. при направлении тока от потенциальной шины к общей, а за обратное – направление вектора

индукции, возникающее при течении тока в обратном направлении.

Дроссели  $L2$  и  $L4$  сравнительно быстро насыщаются при отпирании ключа  $VT$ , поскольку к ним в этом случае приложена сумма напряжений

$$U = U_d + U_C,$$

где  $U_C$  – напряжение на конденсаторе  $C_k$ .

Дроссели  $L1$  и  $L3$  продолжают намагничиваться в обратном направлении, так как токи, текущие по внутренним контурам, не изменият своего направления до полной перезарядки конденсатора  $C_k$ . После отпирания транзистора  $VT$  появляются прямые сквозные токи, намагничающие все дроссели в прямом направлении, поэтому по дросселям  $L1$ ,  $L3$  течёт разность токов, определяющая знак вектора индукции и, соответственно, прямую и обратную намагниченность. Время перемагничивания дросселей  $L1$ ,  $L3$  (время задержки  $\tau$ ) должно быть больше длительности импульса рабочего тока (тока после насыщения дросселей  $L2$  и  $L4$ ) для того, чтобы ток рабочего импульса прошёл без помех по цепи потенциальная шина  $-L2-Z_h-C_k-L4-VT$  – общая шина, перезарядил конденсатор  $C_k$  (на конденсаторе меняется полярность напряжения, на рис.1 указано в скобках) и послал сигнал через  $БУК$  на закрытие силового транзистора  $VT$  по окончании рабочего тока. Дроссели  $L1$  и  $L3$  за время этого импульса не придут в состояние насыщения в прямом направлении, а их индуктивности будут относительно велики, поэтому сквозные токи, текущие по дросселям  $L1$ ,  $L4$  и  $L2$ ,  $L3$  от потенциальной шины к общей, будут малы. Именно из-за появления сквозных токов необходимо, чтобы соблюдалось соотношение  $\tau > T/2$ , где  $T/2$  – длительность импульса рабочего тока.

Время задержки  $\tau$  можно оценить по простой формуле [4]

$$\tau = \Delta B N S / U_L, \quad (1)$$

где  $\Delta B = B_S - B$  – размах индукции, в некоторых случаях  $\Delta B = 2B_S$ ;  $B_S$  – индукция насыщения сердечников дросселей;  $B$  – индукция, при которой происходит включение силового транзистора  $VT$ ;  $N$  – количество витков в катушке;  $S$  – площадь сечения сердечника;

$U_L$  – напряжение, приложенное к дросселю.

Эта формула верна при условии, что  $U_L$  постоянно либо это скачок напряжения однополярного прямоугольного импульса. В нашем случае к дросселю, например  $L1$ , приложено переменное напряжение, так как на одном выводе дросселя  $L1$  постоянное напряжение потенциальной шины, а на другом выводе дросселя – напряжение синусоидальной формы (напряжение конденсатора  $C_k$ ), поэтому на дросселях  $L1$  и  $L3$  присутствует переменное напряжение. Для более точного определения  $\tau$  подойдёт другая формула, приведённая также в [4].

После перезарядки конденсатора  $C_k$  первый полупериод заканчивается, ток рабочего импульса спадает до нуля, силовой транзистор  $VT$  запирается, дроссели  $L2$  и  $L4$  выходят из состояния насыщения, их индуктивности значительно возрастают. Второй полупериод начинается с паузы, во время которой по внутренним контурам текут токи, направление которых определяет изменённая полярность напряжения конденсатора  $C_k$  (на рис. 1 указана в скобках). Прямой ток теперь будет протекать по дросселям  $L1$  и  $L3$ , а обратный – по дросселям  $L2$  и  $L4$ , и при отпирании транзистора  $VT$  ток рабочего импульса пройдёт по насыщенным дросселям  $L1$  и  $L3$ .

При отпирании силового транзистора  $VT$  по дросселям начинают протекать не только рабочий ток, но и сквозные токи, которые проходят по парам дросселей  $L1, L4$  и  $L2, L3$ , постепенно нарастают по закону [5]:

$$I = U(1 - e^{-TR/L})/R, \quad (2)$$

где  $U$  – постоянное напряжение, приложенное к дросселям, в данном случае  $U = U_d$ ;  $T$  – длительность воздействия напряжения на дроссели;  $R$  – общее сопротивление дросселей;  $L$  – общая индуктивность дросселей.

Если  $TR/L \ll 1$ , то, разлагая в ряд формулу (2), получим выражение  $I = U_d T/L$ , указывающее на пути уменьшения сквозных токов:

– уменьшить входное напряжение  $U_d$ , что не всегда возможно;

– уменьшить время открытого состояния ключа  $T$ , т.е. увеличить резонансную частоту инвертора;

– увеличить суммарную индуктивность дросселей  $L$ , причём в каждой паре дроссе-

лей  $L1, L4$  и  $L2, L3$  один находится в состоянии насыщения; значительно увеличить индуктивность дросселя можно, применив сердечник с большой магнитной проницаемостью.

При запирании силового транзистора  $VT$  на его коллекторе возникает импульс напряжения положительной полярности с большой амплитудой, которую необходимо ограничивать, не нарушая заметно естественно протекающих электромагнитных процессов индуктивного моста. Для ограничения импульсного коллекторного напряжения параллельно диагонали постоянного тока индуктивного моста через диод  $VD$  включены несколько цепей, состоящих из последовательно соединённых резистора  $R1$  и варистора  $RUI$ .

Классификационное напряжение варистора, при котором уже начинается ограничение коллекторного импульса, выбиралось равным половине допустимого импульсного напряжения ключа. Резистор в этой цепи ограничивает ток через варистор, значение резистора выбирают из условия не превышения тепловой мощности, рассеиваемой варистором. Диод  $VD$  уменьшает влияние монтажной ёмкости  $BOH$  на индуктивный мост, так как эта ёмкость подсоединенена к мосту через малую ёмкость диода.

Блок подмагничивания дросселей (БПД) был введён с целью исследования влияния обратного и прямого подмагничивания на электромагнитные процессы, происходящие в преобразователе. Выяснилось, что обратное подмагничивание увеличивает интервал задержки, это ведёт к более легкому запуску инвертора, позволяет повысить входное напряжение  $U_d$ , но также увеличивает импульс коллекторного напряжения при запирании силового транзистора  $VT$ . При прямом подмагничивании ток намагничивания, снижая запасы обратной индукции, уменьшает интервал задержки, ухудшая условия запуска инвертора, что выражается в некотором затягивании входа в устоявшийся режим работы инвертора, но при этом в несколько раз уменьшается коллекторный импульс напряжения. Если инвертор запускать без подмагничивания, а при достижении импульсом коллекторного напряжения некоторого значения включать прямое подмагничивание, постепенно увеличивая его, то можно получить

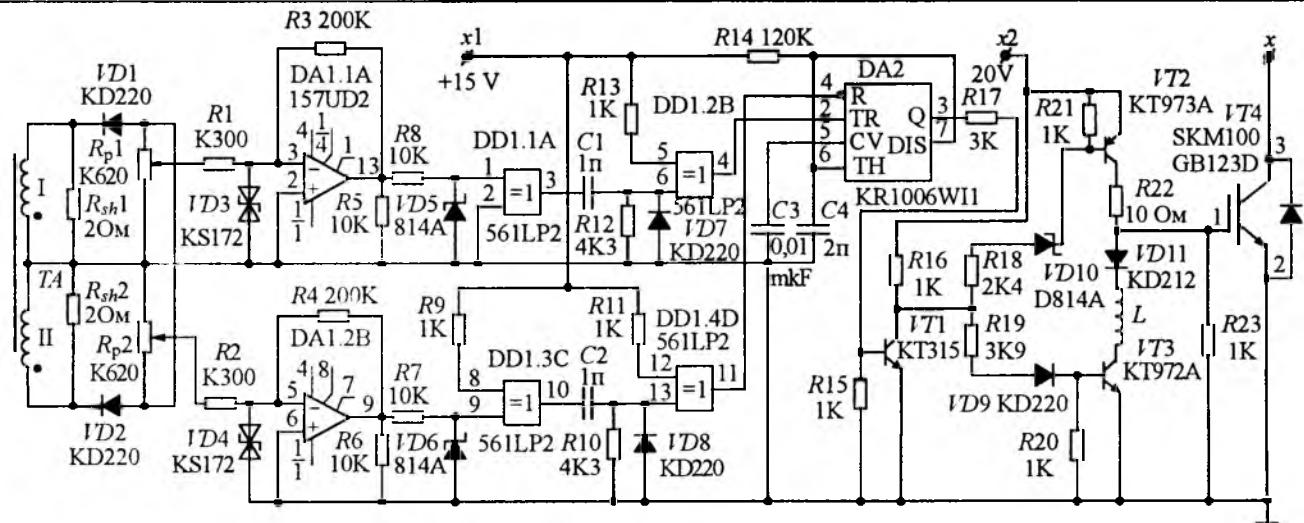


Рис.2. Схема блока управления транзисторным ключом

хорошие результаты по ограничению амплитуды импульса на заданном уровне без ухудшения работы инвертора.

Блок подмагничивания, применённый в инверторе, содержит трансформатор, первичная обмотка которого отделена от вторичной обмотки высоковольтной изоляцией, диодный мост, конденсатор фильтра, индуктивность, токоограничивающий и переменный резисторы (на рис. 1 не показаны).

Блок управления ключом – силовым транзистором *БУК* (рис.2) состоит из двух электронных схем, которые можно условно обозначить как схема запуска и схема выключения. Управляющие сигналы поступают на входы блока управления ключом с двухобмоточного трансформатора тока *ТА*, обмотки которого шунтированы низкоомными резисторами  $R_{sh1}$  и  $R_{sh2}$ . Сигналы отрицательной полярности, сформированные диодами *VD1* и *VD2* и сдвинутые по фазе на  $180^\circ$  один относительно другого, подают на переменные резисторы  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$ , а с них сигналы попадают на инвертирующие входы усилителей – ограничителей *DA1.1* и *DA1.2*. Усиленные и ограниченные сверху сигналы поступают на входы *DD1.1* и *DD1.3*. Пара *DD1.1*, *DD1.2* формирует сигнал на отпирание силового транзистора от фронта импульса рабочего тока, а пара *DD1.3*, *DD1.4* формирует сигнал на запирание силового транзистора от спада импульса рабочего тока. Обработка фронта и спада сигнала происходит с помощью диф-

ференцирующих  $RC$ -цепочек, размещённых между указанными парами. С выходов  $DD1.2$  и  $DD1.4$  импульсы длительностью в 2 мкс поступают на входы таймера  $DA2$ . Отпирающий импульс подают на вход запуска, а запирающий – на вход ограничения, в результате чего на выходе таймера получаем прямоугольные управляющие импульсы, длительность которых равна длительности импульса рабочего тока. Возможная длительность импульса на выходе таймера должна быть в несколько раз больше минимальной длительности сигнала, так как изменение резонансной частоты инвертора вследствие изменения индуктивности нагрузки может быть значительным. Далее сигнал подают на усилитель мощности (транзисторы  $VT1$ ,  $VT2$ ,  $VT3$ ), а с него на силовой ключ – транзистор  $VT4$ . Усилитель мощности выполняют в зависимости от типа силового транзистора. В представленном инверторе в качестве ключа применен JGB-транзистор с изолированным затвором, для которого запирающее напряжение находится в пределах  $0\div-15$  В. Для получения отрицательного запирающего напряжения образован резонансный контур, состоящий из индуктивности  $L$  и ёмкости затвора. Длительность полупериода его колебаний равна 5 мкс при длительности импульса рабочего тока 90 мкс. В отсутствие сигнала положительной полярности на базе транзистора  $VT1$ , на базах транзисторов  $VT2$  и  $VT3$  присутствует напряжение положительной по-

лярности, поэтому транзистор  $VT2$  заперт, а транзистор  $VT3$  открыт, что соответствует нулю тока рабочего импульса. При поступлении импульса напряжения положительной полярности на базу транзистора  $VT1$  он открывается и напряжение на его коллекторе понижается до нуля, что приводит к отпиранию транзистора  $VT2$  и закрытию транзистора  $VT3$ . Напряжение положительной полярности поступает на затвор силового транзистора  $VT4$  и открывает его, заряжая конденсатор, образованный затвором, до напряжения шины питания блока управления, которое равно 20 В. При снятии положительного напряжения с базы транзистора  $VT1$ , запирается транзистор  $VT2$  и открывается транзистор  $VT3$ , происходит перезарядка ёмкости затвора транзистора  $VT4$ . На затворе транзистора  $VT4$  появляется отрицательное напряжение, равное примерно -15 В, запирающее транзистор.

Инвертор (рис.3) с тиристорным ключом  $VS1$  дополнительно содержит устройство его запирания, включённое параллельно диагонали постоянного тока индуктивного моста и состоящее из запирающего конденсатора  $C_c$ , заряжающего резистора  $R2$ , переключателя  $SA1.2$ , запирающего тиристор  $VS2$ , параллельно которому подключена цепь из последовательно соединённых индуктивности  $L$  и диода  $VD1$ . Для запуска инвертора необходимо, чтобы конденсатор  $C_c$  был предварительно заряжён, для этого один из его выводов соединяют с общей шиной через переключатель  $SA1.2$  и резистор  $R2$ . При пуске инвертора заряжающие резисторы  $R$  и  $R2$  отсоединяют от соответствующих конденсаторов переключателем  $SA$ .

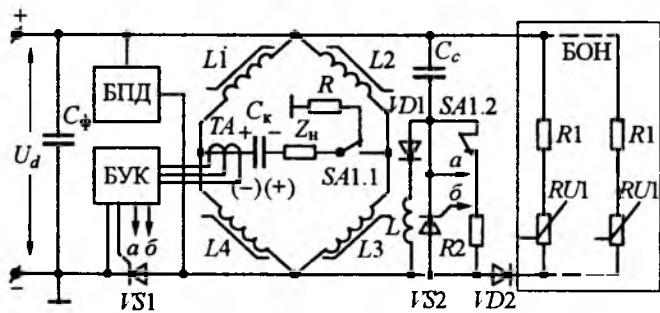


Рис.3. Схема инвертора с тиристорным силовым ключом

Работает устройство следующим образом: в конце импульса рабочего тока БУК открывает тиристор  $VS2$  и на аноде силового тиристора  $VS1$  появляется напряжение отрицательной полярности, запирающее его. К этому моменту времени рабочий ток равен нулю, все дроссели моста не насыщены, по ним протекает небольшой сквозной ток, который разрывается запирающимся тиристором  $VS1$ . На анодах тиристоров  $VS1$  и  $VS2$  появляется импульс напряжения положительной полярности, перезаряжающий конденсатор  $C_c$  через открытый тиристор  $VS2$ , при этом импульс тока, перезаряжающий конденсатор, намагничивает дроссели в прямом направлении, что является отрицательным фактором. После того как конденсатор  $C_c$  перезарядится и его ток упадет до нуля, тиристор  $VS2$  закроется, так как на его катоде появится напряжение положительной полярности, т.е. обратное напряжение. В процессе запирания тиристора  $VS2$  открывается диод  $VD1$ , поэтому на аноде запертого силового тиристора  $VS1$  напряжение остается прежним, равным сумме напряжений потенциальной шины и запирающего конденсатора  $C_c$ , который снова перезаряжается через дроссели моста, перемагничивая их в обратном направлении. Окончательно конденсатор  $C_c$  перезаряжается при следующем включении тиристора  $VS1$ . Индуктивность  $L$  ограничивает ток через диод  $VD1$ . При непредельном (не слишком большом) входном напряжении  $U_d$  достаточно импульсного обратного подмагничивания для уверенного запуска инвертора, при больших входных напряжениях уже необходимо воздействие БПД. Необходимо заметить, что инвертор с тиристорным ключом более "капризен", чем инвертор с транзисторным ключом, например, инвертор с тиристорным ключом не запускается без обратного подмагничивания.

Блок управления (рис.4) тиристорным ключом также содержит две электронные схемы – запускающую и запирающую. Из сравнения рис.2 и 4 видно, что блоки управления похожи, но импульсы, исходящие от  $DD1.2$  и  $DD1.4$ , подают на идентичные формирователи прямоугольных импульсов длительностью 10–15 мкс. Каждый формирователь содержит таймер ( $DA2$  и  $DA3$ ) и трансформаторный усилитель мощности ( $VT1$ ,  $T1$

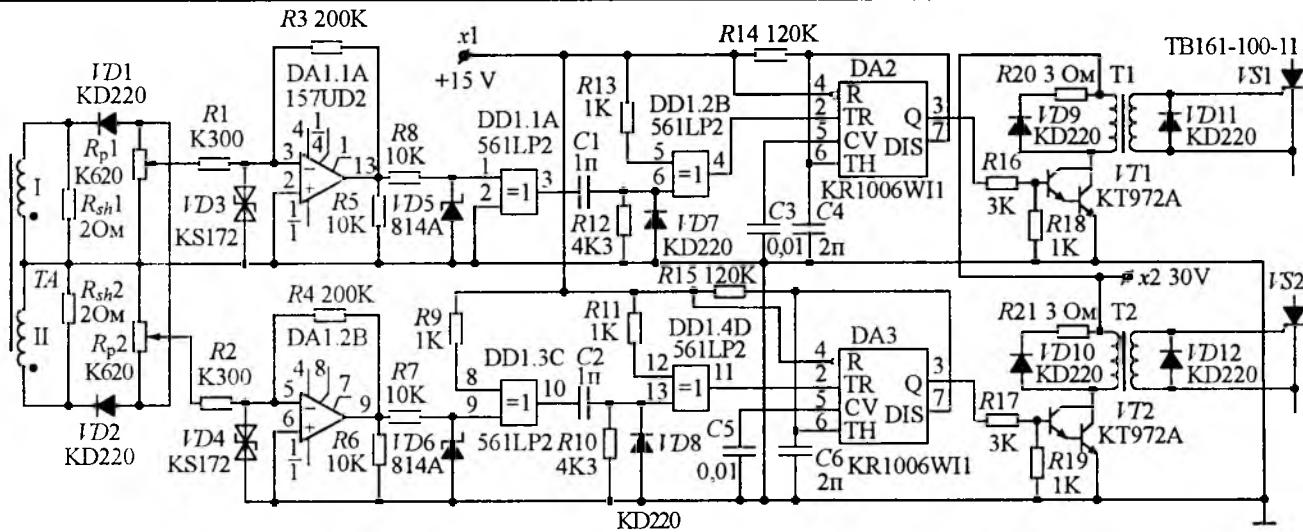


Рис.4. Схема блока управления тиристорным ключом

и  $VT2$ ,  $T2$ ), вторичные обмотки трансформаторов  $T1$  и  $T2$  соединены с соответствующими управляющими электродами и катодами тиристоров  $VS1$  и  $VS2$ . Регулировка выходного напряжения в экспериментальном инверторе производится переменными резисторами  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$ . Регулирующий импульс поступает от трансформатора тока ТА на параллельно соединенные переменные резисторы  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$ , т.е. включающая и выключающая схемы одновременно обрабатывают один и тот же импульс напряжения. Импульс тока, протекающий по нагрузке, состоит из двух частей (кривая 1 на рис.5,а): почти линейно возрастающего тока в промежутке  $t_0-t_1$ , равного времени задержки  $\tau$ , когда дроссели не насыщены, и практически синусоидального импульса тока в промежутке  $t_1-t_3$ . Момент времени  $t_2$  соответствует вершине импульса тока. Силовые вентили можно открыть в промежутке  $t_1-t_2$ , а закрыть в промежутке  $t_2-t_3$ . Кривые 1-3 на рис.5,а это импульсы напряжения на выходах усилителя – ограничителя  $DA1$ , соответствующие разным напряжениям на его входе. Например, при коэффициенте усиления  $DA1$   $K_y = 700$  и амплитуде напряжения 0,01 В на входах  $DA1$ , на его выходах амплитуда напряжения импульсов будет равна  $0,01 \text{ В} \cdot 700 = 7 \text{ В}$ , это напряжение меньше напряжения ограничения  $E_{\text{огр}}$ , которое равно 12 В при питающем напряжении 15 В, но больше порогового напряжения  $E_{\text{пор}}$ , при котором происходит срабатывание микросхемы  $DD1$ . Это напряжение находится в пределах

5–6 В (кривая 1 на рис.5,а). Поэтому на выходах  $DD1.1$  и  $DD1.3$  появится прямоугольный импульс длительностью  $t_{c1}-t_{\phi 1}$  (рис.5,б). При напряжении амплитуды импульса на входах  $DA1$ , равном 0,1 В, на выходах  $DA1$  амплитуда импульса могла быть равной  $0,1 \text{ В} \cdot 700 = 70 \text{ В}$ , если бы не ограничение импульса на выходах

уровнем 12 В (кривая 2 на рис.5,а). Сигнал на выходах  $DD1.1$  и  $DD1.3$ , соответствующий этому импульсу, будет иметь длительность  $t_{c2}-t_{\phi 2}$  (рис.5,б). При амплитуде импульса на входах  $DA1$ , равной 1 В, на выходах  $DD1.1$  и  $DD1.3$  получим прямоугольный импульс, длительность которого равна  $t_{c3}-t_{\phi 3}$  (рис.5,б). Из сравнения кривых 1–3 (рис.5,а) видно, что чем больше амплитуда импульсов на входах  $DA1$ , тем меньше промежуток времени  $t_0 - t_1$  ( $t_0-t_{1.2}$  и  $t_0-t_{1.3}$ ) исходящего импульса, но шире сам импульс. Изменение ширины импульса меняет длительность открытого состояния силового вентиля, вследствие этого коммутирующий конденсатор  $C_k$  заряжается пропорционально этой длительности. Из сказанного следует, что время открытого состояния ключа зависит от амплитуды регулирующего напряжения, т.е. выходное напряжение инвертора можно регулировать широтным способом, но это лишь одна из регулировок выходного напряжения. Другая регулировка заключается в том, что при увеличении времени открытого состояния ключа, увеличивается напряжение на коммутирующем конденсаторе  $C_k$ , а это ведёт к снижению времени

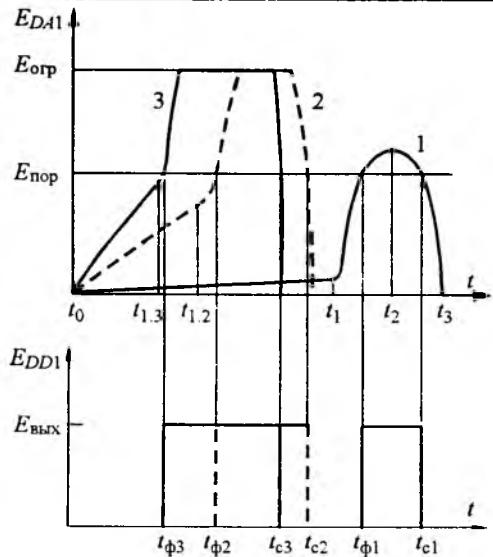


Рис.5. Временные диаграммы сигналов на выходах  $DA1$  и  $DD1.1$ ,  $DD1.3$ , иллюстрирующие связь между значениями амплитуд регулирующего напряжения, подаваемого на входы усилителя  $DA1$ , и длительностью импульсов на выходах  $DD1.1$  и  $DD1.3$  (длительность импульсов на выходах  $DD1.1$  и  $DD1.3$  при значениях амплитуд регулирующего напряжения: 1 – 0,01 В; 2 – 0,1 В; 3 – 1 В)

задержки (уменьшается промежуток  $t_0-t_1$ ) и к сближению импульсов тока, т.е. повышается рабочая частота. При уменьшении времени открытого состояния ключа снижается напряжение на конденсаторе  $C_k$ , что увеличивает промежуток времени  $t_0-t_1$  и приводит к уменьшению рабочей частоты. Следовательно, в инверторе присутствуют две регулировки выходного напряжения – широтная и связанная с ней частотная. Увеличение напряжения на коммутирующем конденсаторе повышает амплитуду рабочего тока, а увеличение рабочей частоты повышает действующий рабочий ток, текущий по нагрузке, что вызывает рост напряжения на нагрузке. Отсюда следует, что напряжение на нагрузке инвертора регулируется двумя способами: широтным и зависящим от него частотным. Подобный результат можно получить меняя входное напряжение  $U_d$ , но такой способ регулировки выходного напряжения не всегда приемлем. Указанные способы регулировки выходного напряжения позволяют работать инвертору при значительно меняющемся входном напряжении. Если поддерживать регулирующее напряжение на одном уровне при изменении входного напряжения, то диапазон изменения входного напряжения  $U_d$

по отношению к минимальному входному напряжению может составлять несколько десятков раз при неизменном выходном напряжении.

Описанный инвертор относится к самовозбуждающемуся типу преобразователей, которые работают при наличии положительной обратной связи. В экспериментальном инверторе обратную связь изменяют при помощи переменных резисторов  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$  вручную. При таком способе регулирования обратной связи можно соотнести значение регулирующего напряжения с положением подвижного контакта переменных резисторов. При некотором положении рукояток переменных резисторов происходит первый запуск инвертора при заданном входном напряжении  $U_d$ . Это положение можно назвать первой "точкой" запуска, поэтому при неизменной нагрузке можно составить таблицу "точек" запусков для разных входных напряжений.

Перед поиском "точек" запуска инвертор необходимо подключить к источнику питания через токоограничивающий резистор, а ёмкость конденсатора фильтра  $C_\phi$  после резистора должна быть несколько тысяч микрофарад, последовательно с нагрузкой включить ещё один трансформатор тока и с его обмотки, шунтированной низкоомным резистором, подать сигнал на осциллограф. Поиск "точки" запуска при заданном входном напряжении начинают при полностью выведенных регуляторах потенциометров  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$ , затем, сдвинув подвижной контакт потенциометра  $R_{p2}$  на некоторое значение, проходят мелкими шагами весь диапазон изменения сопротивления потенциометра  $R_{p1}$  от начала до конца, каждый раз включая контактор  $SA$  после произведённого шага. Если нет запуска, то снова слегка сдвигают контакт потенциометра  $R_{p2}$  и так же проходят весь диапазон изменения сопротивления потенциометра  $R_{p1}$  от начала до конца, каждый раз включая контактор  $SA$ . Если произошёл запуск при каком-то положении регуляторов потенциометров  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$ , необходимо, оставив  $R_{p1}$  на найденной "точке" запуска, определить диапазон изменения сопротивления потенциометра  $R_{p2}$ , при котором происходит уверенный запуск инвертора на найденной первой "точке" запуска. Выставив потенциометр  $R_{p2}$  в средней части найденного диапазона, изменяют входное напряжение  $U_d$  на

$\Delta U$  и снова проходят весь диапазон изменения сопротивления потенциометра  $R_{p1}$ , таким образом составляют таблицу соответствия значений входного напряжения  $U_d$  положению контактов потенциометров  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$ . Верньеры потенциометров должны быть предварительно проградуированы. Поиск "точек" запуска инвертора значительно облегчает осциллографирование сигналов, приходящих от трансформатора тока, так как чем больше время осцилограммы, тем ближе "точка" запуска.

Автором был использован осциллограф с памятью, при однократном запуске которого от приходящего сигнала, длительность осцилограммы можно точно измерить. Кроме того, из-за магнитострикционного эффекта дроссели звучат, издавая характерный "писк", поэтому качество включения (запуска) можно контролировать также по длительности звука. При поиске "точек" включения появление звука дросселей указывает на приближение к такой "точке". Если запуск происходит на первом шаге изменения  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$ , то это означает, что напряжение, подаваемое на потенциометры, чрезмерно велико, если же запуск происходит в самом конце диапазона изменения сопротивления потенциометров, то напряжение мало, в этом случае необходимо, например, соответственно уменьшать либо увеличивать шунтирующие резисторы  $R_{sh1}$  и  $R_{sh2}$ .

В экспериментальном инверторе в качестве силовых ключей применены транзистор SKM100GB123D, тиристор ТБ161-100-11, в качестве запирающего тиристора  $VS2$  применен тиристор ТЧ25-12, для дросселей  $L1-L4$  использованы ферритовые сердечники 3000 НМС ПК40-18, катушки дросселей намотаны шинкой  $2 \times 3$  (6  $\text{мм}^2$ ). На одном собранном сердечнике по две катушки  $L1, L3$  и  $L2, L4$ , индуктивность каждой катушки без сердечника равна 80 мГн. Ёмкость коммутирующего конденсатора  $C_k = 4 \text{ мкФ}$ , ёмкость запирающего конденсатора  $C_c = 0,3 \text{ мкФ}$ , индуктивность  $L$ , включённая параллельно запирающему тиристору  $VS2$ , равна 300 мГн. В качестве нагрузок использованы резистор примерно 1 Ом, индуктивность 50 мГн. Напряжение источника питания  $U_d$  регулировалось от 30 до 300 В.

Электрическая схема запирания силового тиристора, приведённая автором, более эффективна и экономична из всех схем, испытанных автором, поскольку она использует часть энергии, накопленной дросселями индуктивного моста при прохождении по ним сквозного тока, для зарядки запирающего конденсатора  $C_c$ , тем самым уменьшая амплитуду импульса анодного (коллекторного) напряжения, другая часть энергии рассеивается в БОН.

## Выводы

1. Применение нелинейных индуктивностей в качестве переключающих элементов сделало возможной широтную регулировку и связанную с ней частотную регулировку выходного напряжения инвертора.

2. Мостовой резонансный инвертор содержит один силовой ключ, что значительно упрощает управление им и позволяет создать высокоэффективную систему регулирования выходного напряжения.

3. В представленном экспериментальном инверторе применены дроссели с ферромагнитными сердечниками, приходящими в глубокое насыщение, поэтому при ненадлежащем выборе ферроматериалов для сердечников потери в них будут значительны.

4. Целесообразны дальнейшее, более детальное и углубленное исследование электромагнитных процессов инвертора, нахождение потерь в дросселях, определение качества регулирования выходного напряжения, выявление средств эффективного подавления импульсов, возникающих при запирании силового вентиля, проверка работоспособности на частотах более 20 кГц.

## Список литературы

1. Eric Carroll, Sven Klaka, Stefan Linder. Тиристоры IGCT. Новый подход к сверхмощной электронике // Электротехника. 1998. № 7. С. 46.
  2. Слугоцкий А. Е., Пушкин В. Я. Анализ работы ионного преобразователя повышенной частоты с параллельной схемой анодной цепи на активную нагрузку // Электричество. 1965. № 2. С. 49.
  3. Дизендорф Э. А. Новый тип резонансного инвертора // Электротехника. 2003. № 8. С. 57.
  4. Скороваров В. Е. Работа вентиляй в схемах автономных инверторов с повышенной частотой // Электричество. 1965. № 3. С. 24.
  5. Калашников С. Г. Электричество. М. Физматлит. 2003. С. 207.
- Дизендорф Эдуард Анатольевич – инженер института ядерной физики СО РАН.

# Оперативная диагностика контактора быстродействующего регулятора силового трансформатора

МИХЕЕВ Г.М., ФЕДОРОВ Ю.А., МИХЕЕВ Г.М.

Разработан новый метод диагностики переключения контактора силового трансформатора с учётом влияния индуктивности обмотки. Он позволяет производить необходимые измерения без вскрытия бака регулятора и слива трансформаторного масла, что значительно облегчает и ускоряет процесс диагностики переключения контактора.

Известно, что "качество" электроэнергии во многом зависит от исправной работы устройства переключения ответвлений обмоток силового трансформатора, предназначенного для регулирования напряжения в электрической сети. Устройство переключения ответвлений состоит из самого переключателя ответвлений обмоток (избирателя, предизбирателя), находящегося в баке трансформатора, бака регулятора под нагрузкой (РПН), в котором расположены контакты и токоограничивающие сопротивления левого и правого плеча контактора, а также из приводного механизма, осуществляющего необходимые переключения. Причём омически сопротивления токоограничивающих сопротивлений левого и правого плеча контактора одинаковы.

РПН являются одними из самых уязвимых узлов в силовых трансформаторах. По их вине повреждаются около 13,5% трансформаторов [1]. Основными неисправностями РПН являются: нарушение контактов контактора (КК), обрыв токоограничивающих сопротивлений, нарушение перегородки, изолирующей бак расширителя РПН от бака трансформатора, нарушение герметичности бака контактора и т.д.

В России распространены быстродействующие РПН производства Германии (SAV, SCV, SDV) и Болгарии (РС и РСГ), а также отечественные (РНТА, РНОА). Все они имеют активные токоограничивающие (шунтирующие) сопротивления. Поскольку эти сопротивления не рассчитаны на длительное прохождение тока, время их работы в цикле переключения должно быть ограничено.

*A new method is developed for the contactor switching diagnostics in a power transformer with regard for the influence of the winding inductance. It permits to avoid opening the regulator tank and pouring out the transformer oil while carrying out the necessary measurements, which significantly facilitates and accelerates the contactor switching diagnostics.*

Ограничение времени прохождения тока через токоограничивающие сопротивления обеспечивается быстродействием переключающего устройства.

Диагностика работы, т.е. измерение времени переключения КК РПН указанных типов, в настоящее время осуществляется следующим образом [2]. Вскрывается бак РПН, сливается трансформаторное масло и далее производится осциллографирование фазных токов КК по схеме, исключающей индуктивность обмотки силового трансформатора. О работоспособности контактора делают заключение, анализируя полученные осциллограммы [2, 3].

Такой метод диагностики является дорогостоящим, трудоёмким и весьма продолжительным. Необходимо особо отметить, что слив трансформаторного масла требует наличия специально приготовленной чистой габаритной осущеной ёмкости, маслонасоса, шланга для перекачки масла и весьма квалифицированного персонала. Нарушение технологии слива и последующей заливки масла приводит к ухудшению его диэлектрических свойств, снижению сопротивления изоляции бакелитового цилиндра бака РПН и т.д. Поэтому при большой влажности и отрицательных температурах окружающей среды диагностика переключения КК не производится.

Целью данной работы является разработка новой методики диагностики переключения КК РПН силовых трёхфазных трансформаторов с применением специально разработанного трёхканального цифрового осциллографа, позволяющей изучать работу контакто-

ра без вскрытия бака РПН и слива трансформаторного масла.

### Принцип новой методики

Силовой трансформатор с РПН состоит из обмотки трансформатора с индуктивностью  $L$  и активным сопротивлением  $R_{ph}$ , КК, токоограничивающими сопротивлений  $R_1, R_2$  (рис.1) и переключателя (избирателя, предизбирателя), который на рис.1 не показан.

Контактор со своими контактами и с токоограничивающими сопротивлениями по существу является основным узлом РПН. На рис.1 КК одной фазы представлены моделью пятипозиционного переключателя. Одно переключение РПН соответствует последовательному переводу переключателя в пять положений: "a-b"; "b-c"; "c-d"; "d-e"; "e-f". При обычной методике измерений со вскрытием бака РПН и сливом масла зажим фазы  $A$  подключается к зажиму контактора в точке  $A_0$ . В результате при подключении источника постоянного тока к зажимам  $A$  и  $N$  индуктивность и активное сопротивление обмотки фазы трансформатора оказываются зашунтированными накоротко. При переключении КК РПН с одного положения в другое, на осциллограммах

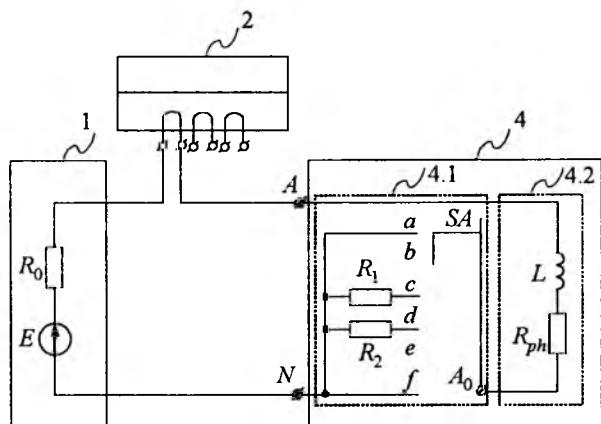


Рис.1. Упрощённая схема замещения цепи "фаза-нейтраль" силового трансформатора относительно высоковольтных вводов с подключенным источником постоянного тока:

1 – внешний источник постоянного тока с ЭДС  $E$  и активным сопротивлением  $R_0$ ; 4 – обмотка трансформатора с индуктивностью  $L$ , сопротивлением  $R_{ph}$  и контактором РПН; 4.1 – контактор РПН с токоограничивающими активными сопротивлениями  $R_1, R_2$  и контакты контактора, представленные в виде переключателя SA; 4.2 – обмотка силового трансформатора с индуктивностью  $L$ , сопротивлением  $R_{ph}$

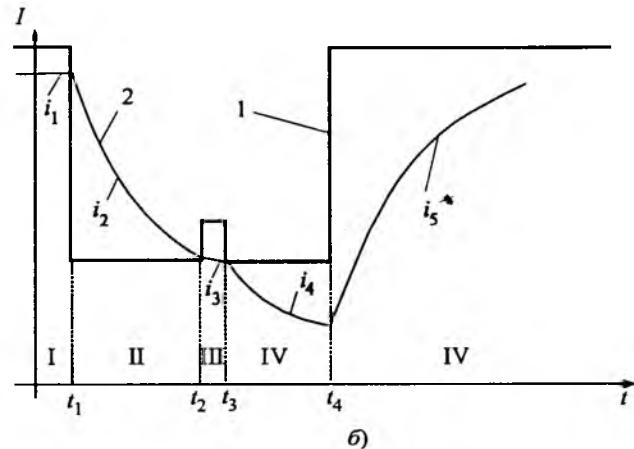
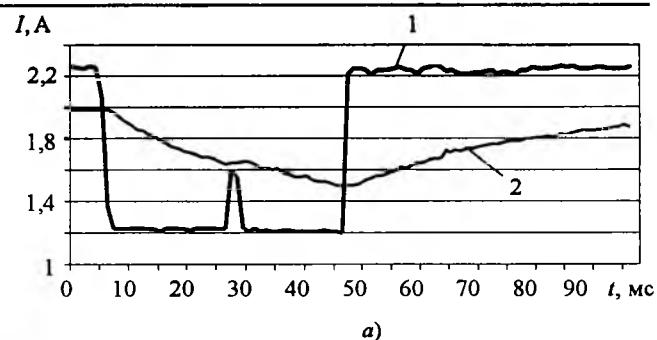


Рис.2. Осциллограммы фазного тока контактов контактора РПН:

а – реальная осциллограмма тока одной из фаз контактора при присоединенной (1) и отсоединеной (2) обмотке трансформатора, полученная с помощью цифрового осциллографа; б – осциллограммы фазного тока, построенные для произвольных параметров  $E, R_0, L, R_{ph}, R_1, R_2$  при присоединенной (1) и отсоединеной (2) обмотке трансформатора

лографе наблюдается скачкообразное изменение тока (рис.2, а, кривая 1). Положению переключателя SA на контактах "a-b"; "b-c"; "c-d"; "d-e"; "e-f" (рис.1) соответствуют участки осциллограммы I, II, III, IV, V (рис.2, б). Интервал между точками  $t_1$  и  $t_4$  устанавливает длительность переключения, а интервал между точками  $t_2$  и  $t_3$  характеризует длительность нахождения КК в положении так называемого моста.

При диагностике контактора без вскрытия бака РПН отсутствует возможность соединения точек  $A_0$  и  $A$ . Поэтому осциллограмма токов при переключении контактора существенно отличается из-за влияния индуктивности обмотки (рис.2, а, кривая 2). Однако математическая обработка полученной кривой позволяет получить временные характеристики длительности переключения КК.

## Теоретическое обоснование методики

Рассмотрим работу РПН одной фазы с включенной обмоткой трансформатора, имеющей индуктивность  $L$  и  $R_{ph}$  (рис. 1). До начала переключения КК РПН, когда переключатель  $SA$  находится в положении " $a-b$ ", установленный ток

$$i_1 = \frac{E}{R_{ph} + R_0}, \quad (1)$$

где  $E$  – постоянное напряжение внешнего источника питания;  $R_0$  – его внутреннее сопротивление.

Для каждого другого положения переключателя мгновенное значение осциллографируемого тока – тока источника с постоянной ЭДС может быть найдено путём решения линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Переходный ток  $i_2$  при переключении переключателя  $SA$  из положения " $a-b$ " в положение " $b-c$ " можно представить следующим образом:

$$i_2 = \frac{E}{R_{ph} + R_0 + R_1} + \left( \frac{E}{R_{ph} + R_0} - \frac{E}{R_{ph} + R_0 + R_1} \right) \times \times \exp \left( -\frac{t(R_{ph} + R_0 + R_1)}{L} \right), \quad (2)$$

где  $R_1$  – токоограничивающее сопротивление первого плеча КК (рис. 1), здесь и далее время  $t$  отсчитывается с момента начала соответствующего интервала переключения.

Ток  $i_3$ , возникающий при переключении переключателя  $SA$  из положения " $b-c$ " в положение " $c-d$ ", находится из формулы:

$$i_3 = \frac{E}{R_{ph} + R_0 + R_3} + A_3 \exp \left( -\frac{t(R_{ph} + R_0 + R_3)}{L} \right), \quad (3)$$

где

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

– сопротивление в положении "мост", причём  $R_2$  – токоограничивающее сопротивление второго плеча КК,  $A_3$  – постоянная интегрирования, которая находится из условия непрерывности тока в индуктивности в момент коммутации.

Все последующие постоянные интегрирования  $A_4, A_5$  (см. далее) находятся аналогично.

Переходный ток  $i_4$  при переключении из

положения " $c-d$ " в положение " $d-e$ " (с учётом равенства токоограничивающих сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ ) выражается следующим образом:

$$i_4 = \frac{E}{R_{ph} + R_0 + R_1} + A_4 \exp \left( -\frac{t(R_{ph} + R_0 + R_1)}{L} \right), \quad (5)$$

При переключении из положения " $d-e$ " в положение " $e-f$ "

$$i_5 = \frac{E \left( 1 - A_5 \exp \left( -\frac{t(R_{ph} + R_0)}{L} \right) \right)}{R_{ph} + R_0}. \quad (6)$$

На рис. 2, б (кривая 2) изображена осциллограмма, построенная для произвольных параметров модели ( $E, R_0, R_{ph}, L, R_1, R_2$ ) и моментов переключения, при условии  $R_1 = R_2$ .

Анализ осциллограммы для определения параметров процесса переключения КК РПН базируется на очевидных свойствах полученной кривой. Эта кривая является кусочно-непрерывной, состоящей из 5 интервалов. Процесс переключения КК РПН начинается в момент, когда кривая тока уменьшается по экспоненциальному закону (вогнутая), и завершается в момент минимального значения тока, после которого кривая тока увеличивается по экспоненциальному закону (выпуклая). Постоянные времени кривой осциллографирования от момента времени  $t_1$  до  $t_2$  и от момента времени  $t_3$  до  $t_4$  в процессе переключения равны, так как контактор РПН состоит из симметричных плеч, где  $R_1$  и  $R_2$  равны:

$$\tau_2 = \tau_4 = \frac{L}{R_0 + R_{ph} + R_1} \quad (7)$$

Действительно, от момента времени  $t_2$  до  $t_3$  (положение "мост") постоянная времени

$$\tau_3 = \frac{L}{R_0 + R_{ph} + R_1 R_2 / (R_1 + R_2)} \quad (8)$$

или с учётом равенства  $R_1$  и  $R_2$

$$\tau_3 = \frac{L}{R_0 + R_{ph} + R_1 / 2}. \quad (9)$$

Очевидно, что  $\tau_3$  больше  $\tau_2$  и  $\tau_4$ . Поэтому при переключении в положение "мост" увеличивается постоянная времени переходной составляющей тока. Сначала в первом приближении находятся четыре характерные точки  $t_1, t_2, t_3, t_4$  осциллограммы. Интервал меж-

ду точками  $t_1$  и  $t_4$  устанавливает длительность переключения, а интервал между точками  $t_2$  и  $t_3$  характеризует длительность нахождения КК в положении "мост".

Нахождение характерных точек осциллограммы, т.е. границ интервалов однородных участков кривой переходного тока, осуществляется следующим образом:  $t_1$  – определяется как момент времени окончания первого интервала наибольшего тока;  $t_4$  – находится как момент наименьшего значения тока, представляющего собой граничное значение окончания четвертого интервала;  $t_2$  и  $t_3$ , определяются аналогично как моменты, где резко (скакком) изменяются постоянные времени кривой тока переключения КК РПН. После этого вычисляется длительность переключения

$$t_{switch} = t_4 - t_1, \quad (10)$$

находится время длительности "моста"

$$t_{resist brid} = t_3 - t_2. \quad (11)$$

Далее определяется время переключения тока на главных (для РПН типа РС, РСГ, САВ, ССВ, СДВ) или дугогасительных (для РПН типа РНОА, РНТА) КК РПН во II и IV интервалах:

$$t_{switch main contact 1} = t_2 - t_1; \quad (12)$$

$$t_{switch main contact 2} = t_4 - t_3. \quad (13)$$

Заметим, что в ветвях с главными (дугогасительными) контактами присутствует влияние токоограничивающих сопротивлений.

Более точное определение характерных точек  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  возможно при нелинейной аппроксимации экспериментальной зависимости, представленной на рис.2,а (кривая 2), целевой функцией:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t-t_1) + i_3(t-t_2) + i_4(t-t_3) + i_5(t-t_4), \quad (14)$$

где  $i_1(t) = 0$  при  $t > t_1$ ,  $i_2(t-t_1) = 0$  при  $t < t_1$  и  $t > t_2$ ,  $i_3(t-t_2) = 0$  при  $t < t_2$  и  $t > t_3$ ,  $i_4(t-t_3) = 0$  при  $t < t_3$  и  $t > t_4$ ,  $i_5(t-t_4) = 0$  при  $t < t_4$ .

Такая аппроксимация становится возможной с применением современных вычислительных средств при представлении экспериментальных значений тока в виде массива данных  $[i(t_n), t_n]$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  – некоторое целое число. Для этого при измерении токов необходимо использовать цифровой осциллограф, записывающий значения тока

в энергонезависимую память с достаточной частотой дискретизации.

### Реализация методики

Очевидно, что применение обычного многоканального аналогового осциллографа типа Н107 и ему подобных для диагностики КК предложенным методом не представляется возможным. Поэтому нами разработан трёхканальный цифровой осциллограф, структурная схема которого показана на рис.3. Он имеет датчики тока 2.1, аналого-цифровой преобразователь 2.2, блок энергонезависимой памяти 2.3, вычислительный блок 2.4, блок запуска цифровой регистрации 2.5, жидкокристаллический дисплей (ЖКД) 2.6, порт связи с компьютером 2.7.

Цифровой осциллограф, внешний вид которого приведен на рис.4, позволяет хранить до 250 записей, в каждой из которых по 3 осциллограммы тока. Частота дискретизации осциллографа 4 кГц, разрядность оцифровки аналогового сигнала 12, масса около 1,5 кг, габариты 210×180×120 мм. Портативность и возможность записи большого количества осциллограмм делают его удобным при выезде на удалённый объект и обследовании в различных положениях РПН нескольких трансформаторов, позволяя создавать удобный массив данных.

На рис.5 приведена структурная схема для осциллографирования процесса переключения КК быстродействующего РПН силового трансформатора. Схема содержит трёхканальный источник постоянного напряжения 1,

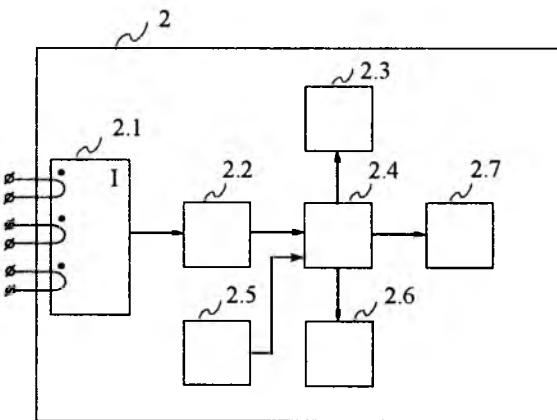


Рис.3. Структурная схема трёхканального цифрового осциллографа

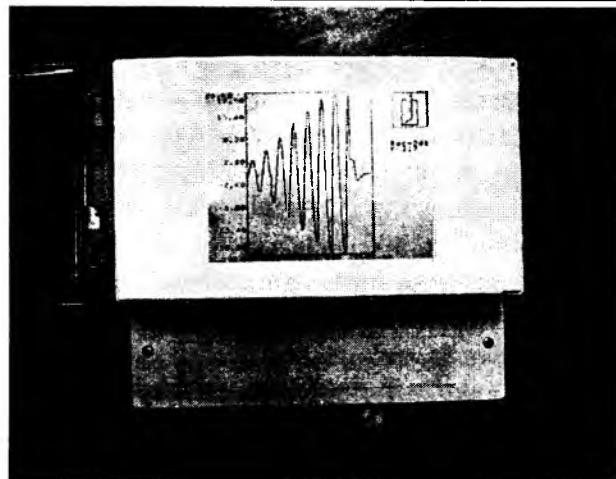


Рис.4. Внешний вид цифрового осциллографа

трёхканальный цифровой осциллограф 2, соединительный четырёхпроводный кабель 3, испытуемый силовой трёхфазный трансформатор с РПН 4.

Диагностика КК осуществляется следующим образом. Оператор переводит электрический привод РПН, допустим, в положение "один". После включения источника 1 в сеть питания (рис.5), по обмоткам трансформатора 4, каналам тока цифрового осциллографа 2 и кабелю 3 проходит ток. Однако из-за большой индуктивности обмотки время нарастания тока составляет около 10–15 мин и осциллографирование производится лишь после его установления.

До установления токов в фазах обмотки оператор наблюдает на ЖКД плавное увеличение тока. При установлении токов в фазах обмотки трансформатора оператор с помощью блока запуска цифровой регистрации 2.5 (рис.3) подаёт команду пуска. Вычислительный блок 2.4 при этом определяет три установки на срабатывание трёх пусковых органов для каждого из токовых каналов 2.1 цифро-

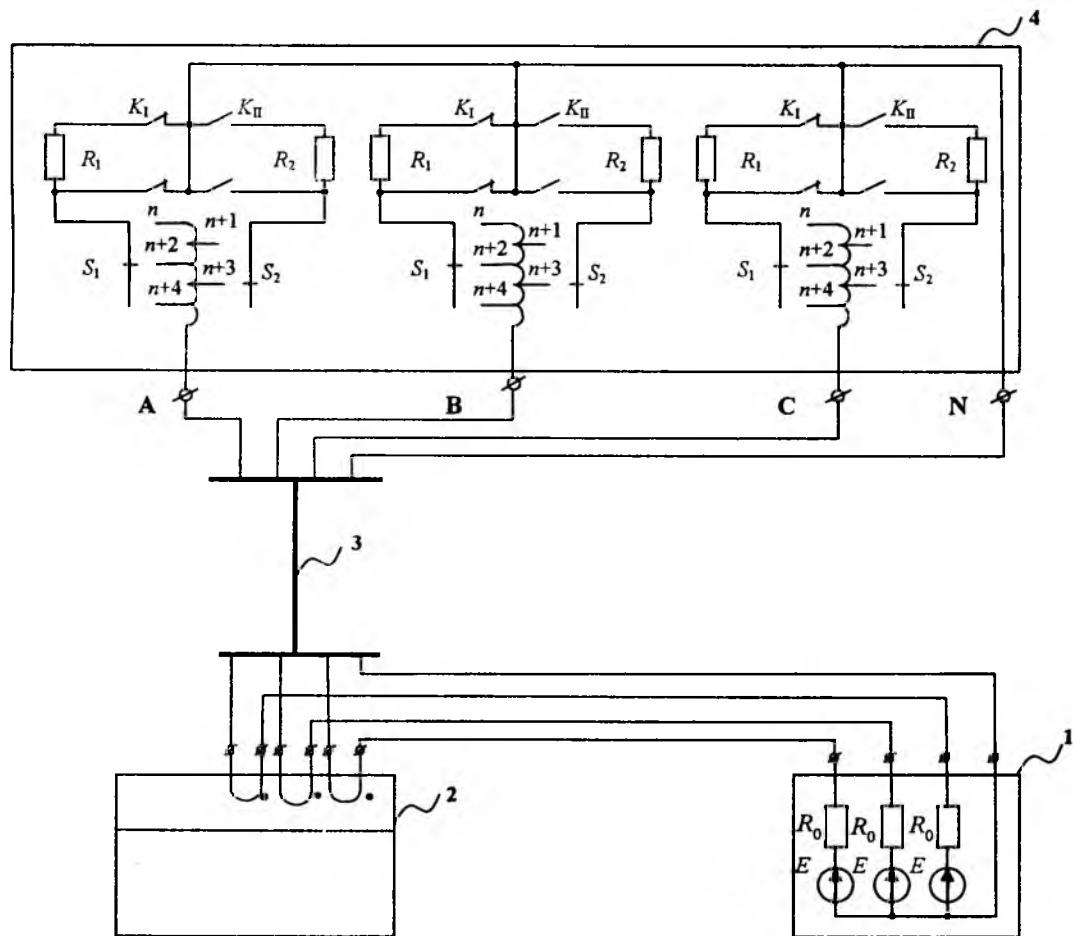


Рис.5. Структурная схема устройства, предназначенного для оперативной диагностики переключения КК быстродействующего РПН силового трансформатора:

$K_1, K_2$  – контактная система первого и второго плеча контактора;  $R_1, R_2$  – токоограничивающие сопротивления первого и второго плеча контактора, соответственно;  $S_1, S_2$  – избиратели (переключатели);  $E$  – ЭДС источника постоянного напряжения;  $R_0$  – внутреннее сопротивление источника постоянного напряжения

вого осциллографа 2, принимая их несколько меньшими значений установившихся токов в соответствующих фазах. Далее цифровой осциллограф 2 переходит в состояние ожидания пуска. После этого оператор с помощью электрического привода переводит РПН в положение "два". В момент переключения КК происходит пофазное снижение токов. При этом срабатывают пусковые органы цифрового осциллографа 2 и он регистрирует фазные токи обмотки трансформатора в блоке энергонезависимой памяти 2.3.

После этого цифровой осциллограф 2 (рис.3) одновременно измеряет токи датчиками тока 2.1, преобразовывает аналоговые величины в цифровые при помощи блока аналого-цифрового преобразования 2.2. Далее блок 2.4 вычисляет постоянные составляющие токов в каждой из трёх фаз путём их усреднения и выдаёт полученные значения на ЖКД 2.6. Такой цикл "измерение–вычисление–визуализация" повторяется с интервалом 1 с.

Циклы "измерение токов – выбор уставок пусковых органов – переключение РПН с записью токов в энергонезависимую память – ожидание установления тока" производятся для нескольких положений РПН в направлении увеличения и уменьшения положения избирателя.

Операции цикла "измерение токов – выбор уставок пусковых органов" выполняют автоматическую настройку на изменения установленного тока при переключении РПН, обусловленные изменением активного сопротивления обмотки: добавлением или исключением активного сопротивления фазной обмотки между положениями избирателя. Так обеспечивается автосинхронизация запуска цифрового осциллографа. Пример осциллограммы тока, полученной по одной фазе, приведен на рис.2,а, (кривая 2). Кривая 1 на рис.2,б получена после обработки вычислительным блоком цифрового осциллографа кривой 2, построенной для произвольных параметров  $L$ ,  $R_0$ ,  $R_{ph}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ , с учётом равенства сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ .

Для ускорения установления тока после включения источника постоянного напряжения может быть использовано увеличение выходного напряжения его каналов операто-

ром с помощью цепей регулирования выходного напряжения. При этом рост установившегося значения тока, позволяет также повысить точность измерения, так как эти измерения производятся в той части измерительного диапазона, где погрешность измерения минимальна.

После окончания осциллографирования токов для нескольких положений РПН данные из блока энергонезависимой памяти через порт связи 2.7 передаются в персональный компьютер, где используются многофункциональные возможности последнего.

#### Достоинства разработанной методики

Основными достоинствами предложенного способа и устройства для его осуществления являются:

- сокращение материальных затрат и времени для подготовки процесса осциллографирования;
- простая схема измерения;
- исключение вероятности загрязнения диэлектрической жидкости и окружающей среды;
- возможность определения правильной работы КК при любых условиях окружающей среды;
- исключение необходимости специально обученного персонала для подключения осциллографа к выводам обмотки трансформатора;
- определение и оценка основных параметров процесса переключения КК РПН;
- возможность создания базы данных в электронном виде.

#### Вывод

Разработанный способ диагностики переключения контактора без вскрытия бака РПН и слива трансформаторного масла с помощью специально выполненного трёхканального цифрового осциллографа значительно упрощает процесс измерений, исключает возможность ухудшения диэлектрических свойств масла, загрязнение окружающей среды, снижения сопротивления изоляции бакелитового цилиндра бака РПН, а также позволяет оперативно сохранять в электронном виде данные измерений с последующей передачей их в персональный компьютер и пользоваться многочисленными функциональными возможностями последнего.

Список литературы

1. Ванин Б.В., Львов Ю.Н., Львов М.Ю. и др. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации // Электрические станции. 2001. № 9. С.53–58.

2. Якобсон И.Я. Наладка и эксплуатация переключающих устройств силовых трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1985.

3. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. Раздел 2. Методы контроля состояния силовых трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих и дугогасящих реакторов. М.: ОРГРЭС, 1997.

**Михеев Георгий Михайлович** – главный инженер ООО "Инженерный центр", канд. техн. наук. Окончил факультет электрификации промышленности Чувашского государственного университета им.И.Н. Ульянова по специальности "Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хо-

зяйства" в 1982 г. Защитил диссертацию по теме "Автоматизация приборов для исследования и контроля диэлектрических жидкостей в энергетике" в 1998 г. Заслуженный изобретатель Чувашской Республики.

**Федоров Юрий Алексеевич** – ведущий инженер НИЛ ООО "Инженерный центр". Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова по специальности "Автоматика и телемеханика" в 1986 г. и заочную аспирантуру.

**Михеев Геннадий Михайлович** – заведующий лабораторией лазерной спектроскопии института прикладной механики Уральского отделения УрО РАН, доктор физ.-мат. наук. Окончил физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова в 1981 г. Защитил диссертацию по теме "Лазерная диагностика водорода на основе вынужденного комбинационного рассеяния света" в 1999 г. Заслуженный изобретатель Удмуртской Республики.

## О повышении удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов

ГРЕБЕННИКОВ И.Ю., ГУНЬКО В.И., ДМИТРИШИН А.Я., ОНИЩЕНКО Л.И., ШВЕЦ И.С.

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины

Возрастающий уровень высоковольтной импульсной техники требует создания новых типов высоковольтных импульсных конденсаторов с повышенными значениями удельной запасаемой энергии и ресурса. Такие конденсаторы необходимы для многих областей науки и техники (лазерная техника, нефтедобыча и др.), где особенно остро стоят вопросы снижения массогабаритных показателей, повышения удельных энергетических характеристик, надёжности и срока службы оборудования, электрофизических установок.

Проведённые в ИИПТ НАН Украины исследования показали, что повышение удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов может быть достигнуто применением в качестве рабочего диэлектрика секций конденсаторов чисто плёночной изоляции, пропитанной неполярным жидким диэлектриком

с высокой газостойкостью и стойкостью к ЧР, с низким тангенсом угла потерь.

Удельная запасаемая энергия конденсаторов по объёму (удельная энергоёмкость  $W_{уд}$  чисто плёночного пропитанного конденсаторного диэлектрика без учёта характеристик материала обкладок) может быть определена по известной формуле:

$$W_{уд} = \frac{\epsilon_{\text{п}} E_p^2 \left[ d_{\text{п}} + \left( \frac{\epsilon_{\text{п}}}{\epsilon_{\text{ж}}} \right) d_{\text{ж}} \right]}{2(\rho_{\text{п}} d_{\text{п}} + \rho_{\text{ж}} d_{\text{ж}})}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_{\text{п}}$ ,  $\epsilon_{\text{ж}}$  – относительные диэлектрические проницаемости полимерной плёнки и пропитывающей жидкости соответственно;  $E_p$  – рабочая напряжённость электрического поля в диэлектрике;  $d_{\text{п}}$ ,  $d_{\text{ж}}$  – общие толщины плёнки и пропитывающей жидкости соответственно;  $\rho_{\text{п}}$ ,  $\rho_{\text{ж}}$  – плотности плёнки и жидкости соответственно.

Вопросы повышения удельной энергоёмкости конденсаторов с чисто плёночным рабочим диэлектриком рассматривались в [1,2]. В [1] этот вопрос решался за счёт повышения относительной диэлектрической проницаемости плёночного диэлектрика посредством применения поливинилиденфторидной плёнки (ПВДФ). Однако плёнка ПВДФ с  $\epsilon_{\text{п}}$  от 10 до 14 из-за высоких диэлектрических потерь (при частоте  $10^3$  Гц и температуре  $20^{\circ}\text{C}$   $\text{tg}\delta = 0,015$ , а при более высокой частоте ( $10^6$  Гц)  $\text{tg}\delta = 0,22$ ) может применяться только в конденсаторах, эксплуатирующихся в моноимпульсном режиме, и уже при частоте следования зарядов-разрядов 1–2 Гц в структуре рабочего диэлектрика конденсатора возникают места локального перегрева, что ведёт к его быстрому выходу из строя.

В [2] с учётом [1] уже рассматривалась не сама ПВДФ плёнка, а композиция полиэтилентерефталатной плёнки ПЭТ-КЭ толщиной  $d_{\text{п1}} = 20$  мкм,  $\epsilon_{\text{п1}} = 3,2$  с нанесённым на неё слоем ПВДФ плёнки толщиной  $d_{\text{п2}} = 2$  мкм,  $\epsilon_{\text{п2}} = 10$ , т.е. суммарной толщиной  $d_{\text{п}} = 22$  мкм. Для сравнения рассматривалась полипропиленовая плёнка ПП с  $\epsilon_{\text{п}} = 2,2$ . Определим эквивалентную относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_{\text{п}}$  композиции ПЭТ-КЭ – ПВДФ по известной формуле:

$$\epsilon_{\text{п}} = \frac{d_{\text{п}}}{\frac{d_{\text{п1}}}{\epsilon_{\text{п1}}} + \frac{d_{\text{п2}}}{\epsilon_{\text{п2}}}}. \quad (2)$$

Эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость композиции ПЭТ-КЭ – ПВДФ  $\epsilon_{\text{п}} = 3,41$ , т.е. по сравнению с плёнкой ПЭТ-КЭ возрастает незначительно, но как показано в [2], длительная электрическая прочность этой композиции уже выше, чем у ПВДФ плёнки. Однако в этой композиции также наблюдаются места локального перегрева.

Вопросу повышения удельной запасаемой энергии конденсаторов за счёт применения чисто плёночного диэлектрика уделено внимание и в [3], но чисто плёночный диэлектрик рассматривался применительно к повышению рабочей частоты следования зарядов-разрядов конденсаторов и не отражена взаимосвязь среднего ресурса конденсаторов с их удельной запасаемой энергией в случае при-

менения чисто плёночного диэлектрика.

Цель данной статьи – оценка достичимой удельной энергоёмкости высоковольтных импульсных конденсаторов на основе пропитанных чисто плёночных диэлектриков с учётом ресурса конденсаторов.

В качестве объектов исследования использовались следующие структуры трёхслойного чисто плёночного диэлектрика:

– полипропиленовый толщиной 36 мкм на основе полипропиленовой плёнки ПП-КСШ;

– полиэтилентерефталатный толщиной 35 мкм на основе полиэтилентерефталатной плёнки ПЭТ-КЭ;

– комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный толщиной 34 мкм на основе двух слоёв полипропиленовой плёнки ПП-КСШ и расположенного между ними слоя полиэтилентерефталатной плёнки ПЭТ-КЭ;

– комбинированный поликарбонатно-полиэтилентерефталатный толщиной 35 мкм, на основе двух слоёв полиэтилентерефталатной плёнки ПЭТ-КЭ и расположенного между ними слоя поликарбонатной плёнки ПК-К.

В качестве жидких пропитывающих диэлектриков исследовались фенилксилилэтан (ФКЭ) и трансформаторное масло Т-1500.

Экспериментальные исследования кратковременной и длительной электрической прочности выбранных структур чисто плёночного диэлектрика проводились на макетах секций высоковольтного импульсного конденсатора.

В табл. 1 приведены данные экспериментальных исследований по определению кратковременной электрической прочности различных структур чисто плёночного диэлектрика.

Критерием отбора структур чисто плёночного диэлектрика для проведения экспериментальных исследований по определению их длительной электрической прочности служили значения их кратковременной электрической прочности. Поэтому для проведения дальнейших исследований были выбраны структуры с наибольшей электрической прочностью – полипропиленовый диэлектрик, пропитанный фенилксилилэтаном; полиэтилентерефталатный, пропитанный трансформаторным маслом Т-1500, комбинированный поликарбонатно-полиэтилентерефталатный, пропитанный трансформаторным маслом

Таблица 1

## Данные по определению кратковременной электрической прочности

Плёночный диэлектрик	Пропитывающий диэлектрик	$d_{\text{п.}}$ мкм	$\text{tg } \delta$	$R_{\text{из.}}$ , МОм, не менее	$E_{\text{пр.ср.}}$ , кВ/мм
Полипропиленовый	Фенилксилилэтан	36	0,0015	12500	424,6
	Трансформаторное масло Т-1500		0,0009	23000	334,3
Полиэтилентерефталатный	Фенилксилилэтан	35	0,0079	17500	325,7
	Трансформаторное масло Т-1500		0,0077	25000	437,1
Полипропиленово- полиэтилентерефталатный	Фенилксилилэтан	34	0,0027	13000	407,8
	Трансформаторное масло Т-1500		0,0024	25000	453,0
Поликарбонатно- полиэтилентерефталатный	Фенилксилилэтан	35	0,0033	17000	320,1
	Трансформаторное масло Т-1500		0,0041	25000	435,3

Таблица 2

## Данные по определению длительной электрической прочности

Плёночный диэлектрик	Пропитывающий диэлектрик	$d_{\text{п.}}$ , мкм	$E_{\text{раб.}}$ , кВ/мм	$N_{\text{ср.}}$ , зарядов- разрядов
Полипропиленовый	Фенилксилилэтан	36	173,6	$5,96 \cdot 10^5$
Полиэтилентерефталатный	Трансформаторное масло Т-1500	35	178,6	$4,83 \cdot 10^5$
Поликарбонатно- полиэтилентерефталатный	Трансформаторное масло Т-1500	35	178,6	$5,21 \cdot 10^5$
Полипропиленово- полиэтилентерефталатный	Фенилксилилэтан	34	183,8	$6,27 \cdot 10^5$
	Трансформаторное масло Т-1500			$5,3 \cdot 10^5$

Т-1500 и комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный, пропитанный ФКЭ и трансформаторным маслом Т-1500.

Исследования по определению длительной электрической прочности различных структур чисто плёночного диэлектрика на макетах секций проводились в режиме колебательного разряда с реверсом разрядного тока 0,3, частотой следования зарядов-разрядов 1,5 Гц при высоких значениях рабочей напряжённости электрического поля в диэлектрике.

В табл.2 приведены данные экспериментальных исследований по определению длительной электрической прочности.

По результатам испытаний с использованием эмпирических формул построены графики зависимости удельной запасаемой энергии высоковольтного импульсного конденсатора от его ресурса при рабочих напряжённостях электрического поля в диэлектрике до 183,8 кВ/мм.

На рис.1 и 2 показаны кривые зависимости удельной запасаемой энергии конденсатора от ресурса для различных структур чисто плёночного диэлектрика, пропитанных ФКЭ и трансформаторным маслом Т-1500, в сравнении с бумажно-плёночным диэлектриком, пропитанным касторовым маслом.

пропитанным касторовым маслом.

Из рис.1 видно, что при удельной запасаемой энергии 180 Дж/дм<sup>3</sup> ресурсы конденса-

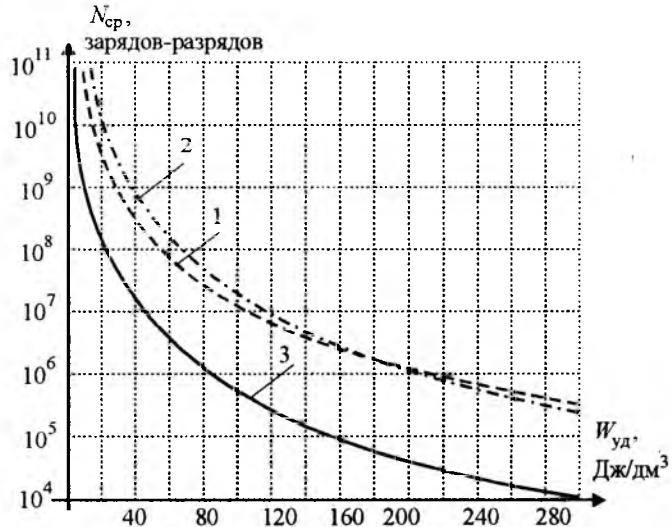


Рис.1. Зависимость среднего ресурса конденсаторов от удельной запасаемой энергии при пропитке плёночного диэлектрика фенилксилилэтаном в сравнении с бумажно-плёночным диэлектриком, пропитанным касторовым маслом:

1 – полипропиленовый диэлектрик; 2 – комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный диэлектрик; 3 – комбинированный бумажно-плёночный диэлектрик, пропитанный касторовым маслом

торов с полипропиленовым и комбинированным полипропиленово-полиэтилентерефталатным диэлектриком, пропитанным ФКЭ, равны. С дальнейшим ростом удельной запасаемой энергии до 300 Дж/дм<sup>3</sup> ресурс конденсаторов с комбинированным диэлектриком незначительно снижается. Это может быть объяснено следующими причинами – меньшей электрической прочностью комбинированного диэлектрика и большими диэлектрическими потерями по сравнению с полипропиленовым диэлектриком.

При снижении удельной запасаемой энергии конденсаторов от 160 до 20 Дж/дм<sup>3</sup> при равном ресурсе конденсаторы с комбинированным полипропиленово-полиэтилентерефталатным диэлектриком имеют большую удельную запасаемую энергию по сравнению с полипропиленовым по причине большей относительной диэлектрической проницаемости комбинированного диэлектрика. Необходимо учитывать и то, что при снижении удельной запасаемой энергии конденсатора до 20 Дж/дм<sup>3</sup> снижалась и рабочая напряжённость электрического поля, а при 100–120 кВ/мм эти диэлектрики имеют примерно равную длительную электрическую прочность.

Анализ зависимостей, приведённых на рис.2, показал, что полиэтилентерефталатный, комбинированные поликарбонатно-полиэтилен-терефталатный и полипропиленово-полиэтилентерефталатный диэлектрики, пропитанные трансформаторным маслом Т-1500 имеют примерно одинаковую зависимость удельной запасаемой энергии конденсатора от ресурса. При этом удельная запасаемая энергия конденсатора с полиэтилентерефталатным и комбинированным поликарбонатно-полиэтилентерефталатным диэлектриком несколько выше, чем у конденсатора с комбинированным полипропиленово-полиэтилентерефталатным диэлектриком из-за большей относительной диэлектрической проницаемости. Если сравнить полиэтилентерефталатный и комбинированный поликарбонатно-полиэтилентерефталатный диэлектрики между собой, то при одном и том же значении удельной запасаемой энергии поликарбонатно-полиэтилентерефталатный диэлектрик обеспечивает более высокий ресурс конденсатора благодаря повышенной стойкости к ЧР поликарбонатной пленки.

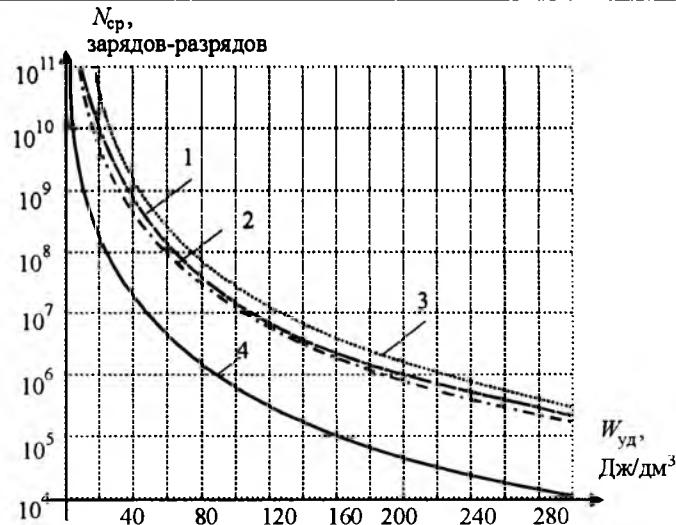


Рис.2. Зависимость среднего ресурса конденсаторов от удельной запасаемой энергии при пропитке чисто плёночного диэлектрика трансформаторным маслом Т-1500 в сравнении с бумажно-плёночным диэлектриком, пропитанным касторовым маслом:

1 – полиэтилентерефталатный диэлектрик; 2 – комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный диэлектрик; 3 – комбинированный поликарбонатно-полиэтилентерефталатный диэлектрик; 4 – комбинированный бумажно-плёночный диэлектрик, пропитанный касторовым маслом

Сравнивая зависимости, приведённые на рис.1 и 2, видим, что в области высоких значений удельной запасаемой энергии, начиная с 140 Дж/дм<sup>3</sup> и выше, т.е. при высоких напряжённостях электрического поля в диэлектрике, пропитка фенилксилилэтаном по сравнению с трансформаторным маслом Т-1500 обеспечивает более высокий ресурс конденсатора. Это объясняется более высокими газостойкостью и напряжённостью начала ЧР в ФКЭ по сравнению с трансформаторным маслом Т-1500.

Анализируя зависимости удельной запасаемой энергии конденсаторов от ресурса для различных структур чисто плёночного диэлектрика, пропитанных ФКЭ и трансформаторным маслом Т-1500, в сравнении с бумажно-плёночным диэлектриком, пропитанным касторовым маслом, видим, что применение чисто плёночного диэлектрика позволяет повысить удельную запасаемую энергию конденсатора при одинаковом ресурсе более чем в 2 раза или на порядок увеличить ресурс конденсатора при одинаковой удельной запасаемой энергии.

саемой энергии в зависимости от структуры плёночного диэлектрика и типа пропитывающей жидкости.

При этом следует отметить, что при применении чисто плёночного диэлектрика пропитывающая жидкость должна быть совместима с применяемой плёнкой и должен быть правильно выбран режим термовакуумной сушки и пропитки, который обеспечивает высокую электрическую прочность рабочего диэлектрика конденсатора, исключив образование воздушных карманов. Вместе с тем необходимо отметить, что длительность цикла термовакуумной обработки конденсаторов с чисто плёночным диэлектриком, а соответственно, и энергозатраты значительно ниже, чем у аналогичных конденсаторов, в конструкции которых применен чисто бумажный или комбинированный бумажно-плёночный диэлектрик.

## Выводы

Применение чисто плёночного диэлектрика в конструкциях высоковольтных импульсных конденсаторов позволит, в сравнении с бумажно-плёночным диэлектриком, повысить удельную запасаемую энергию конденсаторов более чем в 2 раза или увеличить на порядок их ресурс, снизить энергозатраты на их изготовление, а следовательно, уменьшить их стоимость.

## Список литературы

1. Беленький Б.П., Тывина О.В. Проблемы повышения удельной запасаемой энергии конденсаторов с органическим диэлектриком // Электротехника. 1992. № 2. С. 64–66
2. Андреев А.М., Журавлева Н.М., Сажин Б.И., Луцкая Т.В. Оценка удельной энергоёмкости пленочных полимерных конденсаторных структур, пропитанных жидкими диэлектриками // Электротехника. 1994. № 9. С. 57–60.
3. Комин С.Н., Морозов Е.А., Соколова Т.Г. и др. Высоковольтные конденсаторы для мощных импульсных источников питания // Электротехника. 1991. № 5. С. 51–53.

## ЭЛЕКТРОПРИВОД

# Модернизированная система управления электрооборудованием перегрузочной машины ПМ-230 реактора ВВЭР-440 Кольской АЭС

КУЗНЕЦОВ Ю.П., БИРЮКОВ А.В., КАРПОВА Г.В., ПРОКОФЬЕВА Л.А., ЛИМОРЕНКО П.М., НИКИФОРОВ Е.А., ПРИДАТКОВ А.Г., ТЕСКИН Б.А., РЯБИНИН Б.В., ТАРАСОВ С.В.

Предложена новая разработка на основе современных средств системы управления электрооборудованием перегрузочной машины реактора ВВЭР-440 при её модернизации. Показана эффективность модернизации.

Перегрузочная машина ПМ-230 для АЭС представляет сложную электромеханическую систему кранового типа, выполняющую операции по перегрузке (загрузке – выгрузке) реактора тепловыделяющими сборками (ТВС) и их транспортирования в зону хранения (бассейна), а также проведения работ по ремонту и обслуживанию зоны перегрузки. В зону перегрузки входят: ядерный энергетический реактор (аппарат), бассейн выдержки ТВС, транспортный коридор, связы-

*In the article a proposition of the new innovation of the base of up-to-date tools to control electric equipment of the "BBЭ3-440" reactor reload machine by modernization is described, is shown efficiency of modernization.*

вающий зоны аппарата и бассейна, и транспортный чехол, применяющийся при групповой транспортировке ТВС.

Примерный план перемещения ТВС показан на рис.1.

Основным элементом перегрузочной машины для транспортировки ТВС является рабочая штанга, представленная на рис.2.

Перегрузочная машина ПМ-230 проработала 30 лет и, естественно, физический износ достиг допустимого предела. При этом

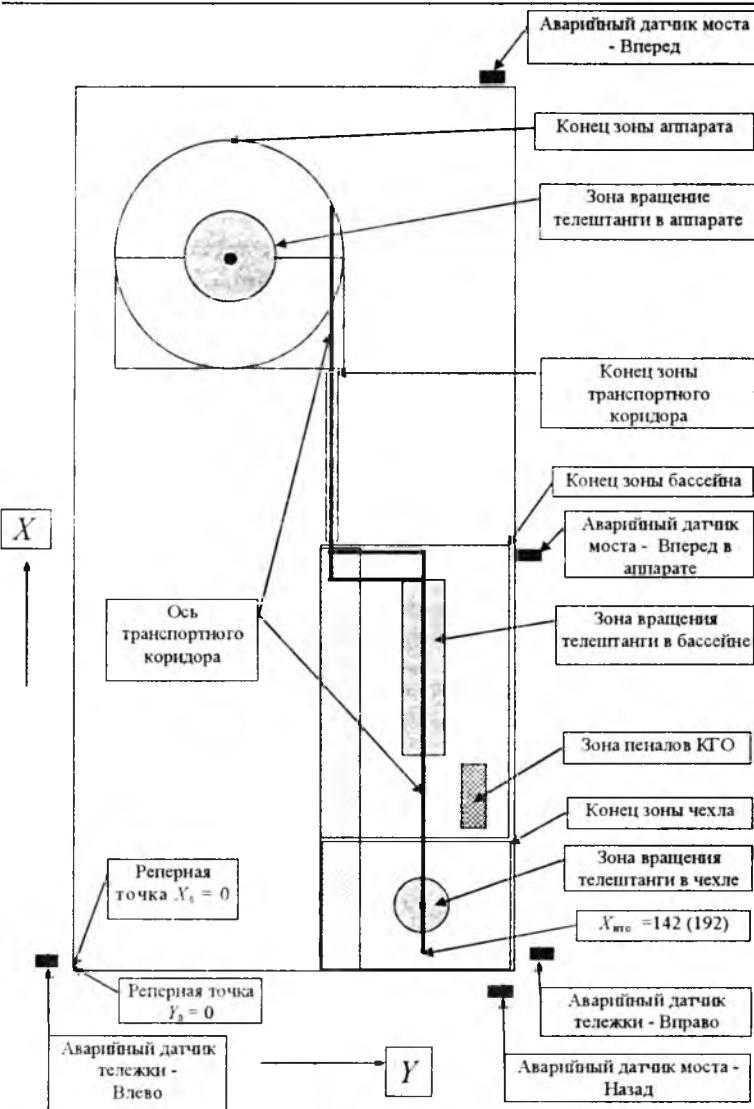


Рис.1

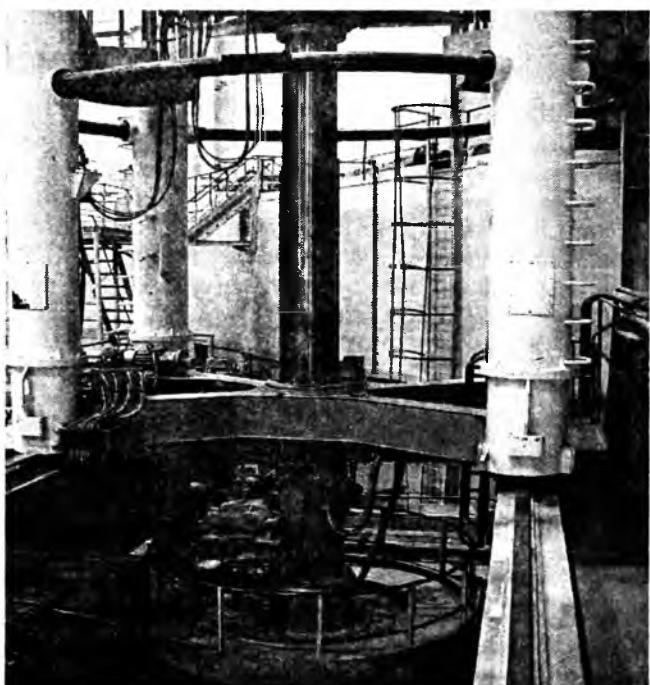


Рис.2

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

и электрические устройства всей установки морально устарели и требовали замены.

Для формирования научно обоснованных требований к созданию новой системы управления электрооборудованием перегрузочной машины ПМ-230 ОАО "Электропривод" и Кольская АЭС провели большие экспериментальные исследования, включающие в себя:

- обследование состояния механической и электрической частей;
- испытание технических характеристик приводов переменного тока;
- разработка нового алгоритма управления.

Кроме этого были согласованы основные технические решения с концерном "Росатомэнерго" и Госатомнадзором России с учётом новых подходов к ядерной безопасности.

Все перечисленные работы дали возможность получить объективную информацию, анализ которой позволил сформулировать научно обоснованное "Техническое задание на модернизацию электрооборудования перегрузочной машины ПМ-230".

ОАО "Электропривод" разработало систему управления электрооборудованием перегрузочной машиной ПМ-230 (в дальнейшем именуемая "система ПМ-230") для реактора ВВЭР-440. На рис.3 представлена блок-схема системы ПМ-230.

Система ПМ-230 обеспечивает плавный пуск и торможение, с возможностью выполнения точной остановки на доводочной скорости, регулируемых механизмов (мост, тележка, реечная ступень, тросовая ступень). Система ПМ-230 предназначена для управления всеми механизмами перегрузки и выполняет:

- ручное наведение ПМ-230 на заданную координату (управление движением моста и тележки) с автоматической остановкой на границах зоны перегрузки;
- ручное управление перемещениями и поворотами рабочей штанги и телевизионной штанги с автоматической остановкой на гра-

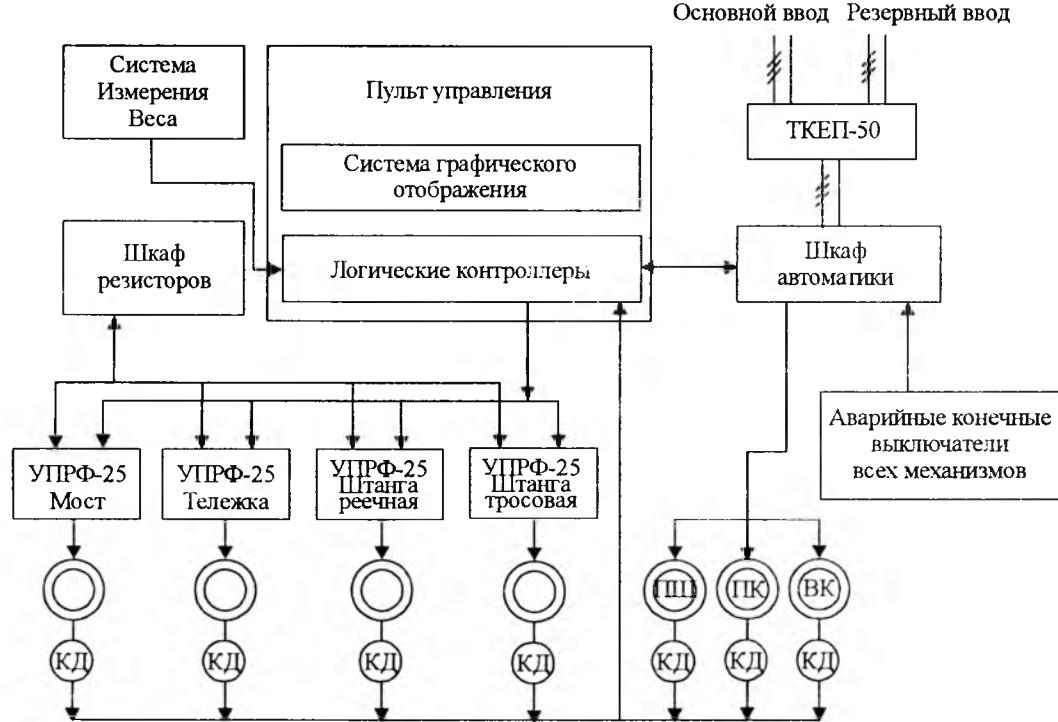


Рис.3

ницах рабочей зоны на заданных углах поворота;

– автоматическое выполнение блокировок перемещения всех механизмов.

Система ПМ-230 выполнена в сейсмостойком исполнении по категории 1 согласно НП 031-01 и 9 баллам (МР3), высота установки над нулевой отметкой – не выше 24 м.

Конструктивно система ПМ-230 состоит из отдельных шкафов, собранных на раме, которая крепится на мосту, и пульта управления, установленного в кабине на тележке. Таким конструктивным решением удалось убрать большое количество гибких связей, приводивших ранее к отказам в работе. На рис.4 представлен общий вид системы ПМ-230.

Питание системы ПМ-230 осуществляется от двух независимых вводов четырёхпроводной сети переменного тока с глухозаземлённой нейтралью, с номинальным линейным напряжением 380 В. Устройство тиристорное коммутационное типа ТКЕП, разработанное ОАО "Электропривод", обеспечивает питание системы ПМ-230 при наличии напряжения на любом из вводов.

Для всех регулируемых механизмов установлены три фиксируемые скорости: номинальная, средняя и доводочная. Оператор, в зависимости от выполняемой операции, с

пульта управления задает требуемую скорость движения. Система ПМ-230 автоматически, вне зависимости от заданной оператором скорости, ограничивает скорость до доводочной в определённых зонах перегрузки, например, при подходе к границам зоны обслуживания.

Тахограмма работы привода приведена на рис.5.

Для управления регулируемыми приводами применены устройства пуска и регулирования электродвигателями с фазным ротором типа УПРФ-25, разработанные ОАО "Электропривод".



Рис.4



Рис.5

ропривод". Устройства УПРФ-25 позволяют осуществлять регулирование скорости с диапазоном 1:60. Такой широкий диапазон регулирования скорости обеспечивает позиционирование механизмов на доводочной скорости с заданной точностью  $\pm 3$  мм.

Управление механизмами перегрузочной машины осуществляется оператором с пульта управления, установленного в кабине на мосту, рядом с пультом физика. Общий вид пультов представлен на рис.6.

В системе ПМ-230 для исполнения команд управления всеми механизмами используются два равноправных логических контроллера, установленных в пульте управления.

Управляющая команда на любой механизм подается обоими контроллерами, соединенными последовательно по принципу "два из двух", что позволяет избежать выполнения ложной команды при отказе одного из контроллеров.

Местоположение механизмов моста, тележки, реечной и тросовой ступени рабочей штанги, телевизионной штанги, угол поворота рабочей штанги и угол поворота телеви-

ционной штанги определяются с помощью абсолютных многооборотных кодовых датчиков. Применение таких датчиков позволило повысить точность измерения и сохранить значения местоположения механизмов при отключении питания системы.

Сигналы с аварийных конечников всех механизмов,

датчиков обрыва троса рабочей и телевизионной штанг и т.д. передаются в контроллеры для использования в алгоритме формирования управляющих команд и сигналов индикации на пульт управления. Помимо этого аварийные конечники задействованы в схемах отключения электродвигателей соответствующих механизмов.

В цифровой форме, в абсолютных значениях с размерностью в миллиметрах и градусах, индикация о местоположении механизмов моста, тележки, реечной и тросовой ступени рабочей штанги, телевизионной штанги, углах поворота рабочей штанги и телевизионной штанги и массе на рабочей штанге выдается на пульт управления.

Применение в системе ПМ-230 новых методов измерения положения механизмов и обработки информации позволило значительно повысить надежность работы перегрузочной машины, а выполнение автоматических блокировок перемещения всех механизмов, реализованное в логических контроллерах, исключило несанкционированное вмешательство обслуживающего персонала.

В системе ПМ-230 на базе промышленного компьютера выполнена задача графического отображения бассейна перегрузки.

На пульте управления установлен монитор, позволяющий оператору в зависимости от выбранного масштаба изображения видеть весь бассейн перегрузки или отдельные его части. На мониторе в реальном масштабе времени отражено местоположение и перемещение рабочей и телевизионной штанг. Одновременно на мониторе высвечиваются в цифровой форме в абсолютных значениях с размерностью в миллиметрах и градусах координаты всех механизмов. При возникнове-

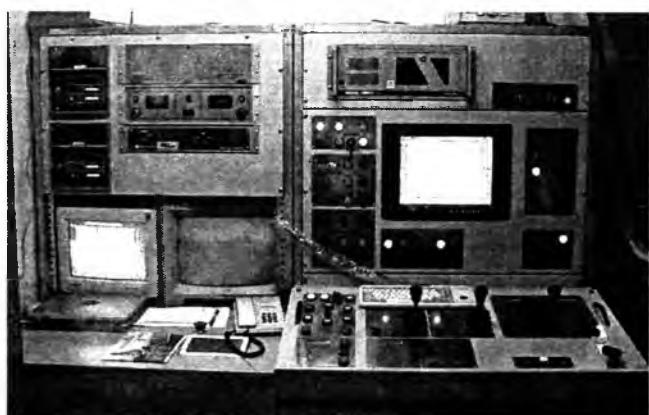


Рис.6

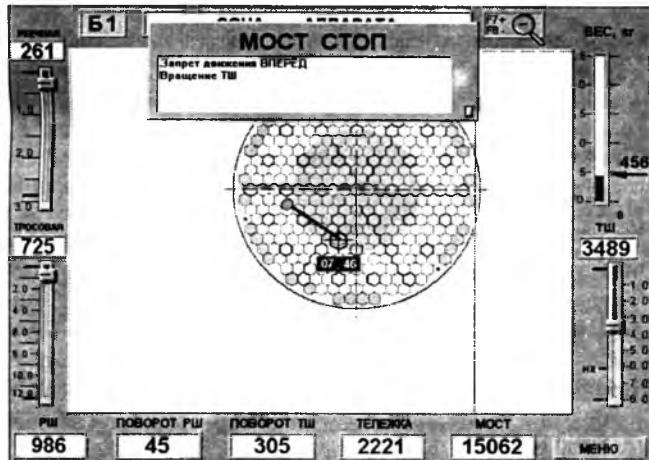


Рис.7

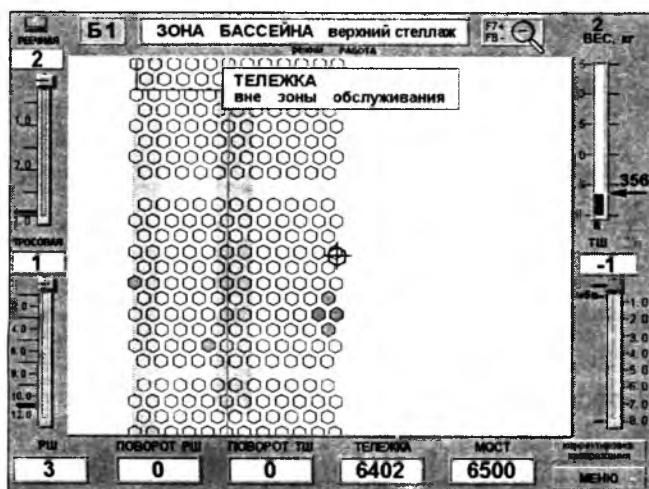


Рис.8

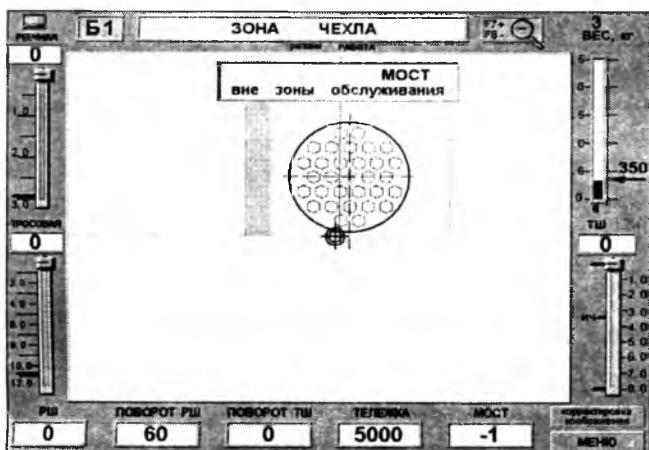


Рис.9

нии аварийных ситуаций или неправильных действиях оператора на мониторе появляется сообщение.

Примеры отображения графического окна "Блок, общий вид" (M1:30) представлены на рис. 7 (зона аппарата, ответ на команду "Мост

Вперёд" при вращении ТШ), рис.8 (зона бассейна, тележка вне зоны обслуживания), рис.9 (зона чехла, мост вне зоны обслуживания).

Использование в системе ПМ-230 промышленного компьютера позволило реализовать некоторые дополнительные сервисные функции, такие как:

- тестовый прогон, предназначенный для подтверждения работоспособности перед началом перегрузки;

- логический контроль над действиями оператора и выдача сообщений, касающихся достижения механизмами ПМ заданных состояний, конечных положений, ошибочных действий оператора и т.п.;

- допуск оператора ПМ в начале смены посредством пароля и назначение ему определённых прав доступа, ограничивающих возможности оператора по управлению;

- хранение архива выполненных операций с возможностью просмотра в графическом виде записанных данных, а также ведение журнала аварийных сообщений;

- выдачу распечатки выполненных операций за смену, за перегрузочную компанию.

Для отработки алгоритма системы ПМ-230 в ОАО "Электропривод" был создан полномасштабный стенд, имитирующий работу всех механизмов перегрузочной машины.

Совместно с представителями Кольской АЭС и Госатомнадзора на данном стенде была проведена проверка работы изготовленной системы ПМ-230.

Результаты проверки подтвердили правильность реализации всех требований, изложенных в техническом задании, и готовность системы ПМ-230 к поставке на Кольскую АЭС.

Высокий уровень технической и конструктивной проработки, а также подготовка комплекта соединительных кабелей позволили в короткий срок (менее 30 дней) смонтировать и наладить систему ПМ-230 на объекте. В процессе наладки проводилось обучение эксплуатационного персонала.

После проверки работы на объекте система ПМ-230 была принята в эксплуатацию.

Эксплуатационный персонал Кольской АЭС провел полный цикл замены топлива реактора на блоке № 2. В процессе работы сбоев и отказов в работе системы ПМ-230 не зарегистрировано.

**Выводы**

1. Проведённая работа по модернизации перегрузочной машины ПМ-230 силами ОАО "Электропривод" и персонала электроцеха Кольской АЭС подтвердила правильность технических решений, принятых на стадии подготовки работы.

2. Замена электромагнитных преобразователей, регулирующих напряжение в статоре, на систему регулирования напряжения в роторе с широким диапазоном регулирования скорости позволила выполнить требования по позиционированию. Минимальные габариты системы регулирования позволили установить их непосредственно на мосту перегрузочной машины ПМ-230 и довести число гибких кабелей с 52 до 5.

3. Создание стенда, максимально приближенного по алгоритму к режимам эксплуатации, дало возможность за 30 дней выполнить на объекте демонтаж, монтаж и сдачу системы ПМ-230 в эксплуатацию.

**Кузнецов Юрий Петрович** – директор НПЦ ОАО "Электропривод". Окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1958 г.

**Бирюков Александр Владимирович** – заместитель директора НПЦ ОАО "Электропривод". Окончил энергетический факультет МИИТ в 1956 г.

**Карпова Галина Владимировна** – заместитель директора НПЦ ОАО "Электропривод". Окончила электромеханический факультет МЭИ в 1975 г.

**Прокофьева Людмила Александровна** – старший научный сотрудник ОАО "Электропривод". Окончила АВТФ МЭИ в 1975 г.

**Лиморенко Пётр Михайлович** – главный научный сотрудник ОАО "Электропривод". Окончил радиотехнический факультет ЭВМ МИИТ в 1981 г.

**Никифоров Евгений Александрович** – заместитель директора НПЦ ОАО "Электропривод". Окончил ЭАПТФ МЭИ в 1975 г.

**Придатков Анатолий Григорьевич** – заместитель директора НПЦ. Окончил радиотехнический факультет МФТИ в 1963 г.

**Тескин Борис Анатольевич** – заместитель начальника электроцеха филиала концерна "Росэнергоатом" "Кольская атомная станция". Окончил Ивановский энергетический институт в 1973 г.

**Рябинин Борис Валерьевич** – ведущий инженер электроцеха филиала концерна «Росэнергоатом» «Кольская атомная станция». Окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова в 1990 г.

**Тарасов Сергей Васильевич** – инженер электроцеха филиала концерна "Росэнергоатом" "Кольская атомная станция". Окончил Московский инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева в 1991 г.

**ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ****О замене низковольтных  
электротехнических аппаратов**

ЗЕКЦЕР Д.М., академик ИАУ

Продолжение и расширение инвестиций в производство, реконструкция, модернизация и усовершенствование технологических процессов требуют дальнейшего широкого применения низковольтных аппаратов распредел-

ления, защиты и управления электрическими сетями и электроприводами.

В данной статье приведены новые замены устаревших изделий, являющиеся продолжением статей, опубликованных в журналах "Электротехника" № 5 и № 11 за 2004 г. и № 8 за 2005 г.

**Реле**

Заменяемый тип реле (старое)	Заменяющий тип реле (новое)
ПЭ37	РП20М
2РВМ	РВу-03
ВЛ36	ВЛ59
ВЛ40, 41	В165
ВС-10	ВС-43
РСН12	НЛ-8
РСН14, РСН15	НЛ-8-1
РСН16, РСН17	НЛ5
РОФ-11, 12, 13	ЕЛ 11, 12, 13
РСН 25 М	ЕЛ 11
РСН 26 М	ЕЛ 12
РСН 27 М	ЕЛ 13
РСТ 11	АЛ 1
РСТ 13	АЛ 1
РТ 351	АЛ 4
РП16-4	ПЭ-92
РВТ-1200	ВС-43
РВМ-12, 13	ВЛ104
УЗОТЭ	РДЦ-01
РЭЗЭ-6	РДЦ-01
РЗД-1	РДЦ-01
РЗД-3 М	РДЦ-01
РН54 и РВ03	ВЛ-103 А
РПТ-100	РЭП-20
РЭП-25	ПЭ-40, 42
РЭП-36	ПЭ 40, 42
РДП-37	ПЭ44, 45
РЭП-38Д	ПЭ 46
РЭП96	ПЭ-44, 45
ТПТ	В1-159
PCB 160	В1-100А
PCB 260	ВЛ-100А
PCB 18	ВЛ-100А, ВЛ-101 А, ВЛ102
Серии PCB 17	ВЛ-81, ВЛ-82, НЛ4
Серии PCB 16	ВЛ 70-й серии
Серии PCB 15	ВЛ 60-й серии
Серии PCB 14	Серии ВЛ101А
PCB13	ВЛ104
PCB 01-4	ВЛ 76
PCB 01-3	ВЛ 81
PCB 01-1	ВЛ-68, ВЛ-76
РРВП-1	РВЦ-03
РПВ-01	ВЛ108
РПВ-58, 69Т	ВЛ108
РЭВ 214-226	РЭ10
РПДК8	РПДК 1 М
ЭВ 237	РВ 237
РУ 1-11	РУ 21, РЭУ-11
РЭПУ-11	РЭУ-11
ВЛ33	ВЛ64
ПЭ21	ПЭ37, ПЭ96
РМУ	РНЕ44
РЭП 15	РЭВ 261

**Кодовые путевые трансмиттеры**

Заменяемый	Заменяющий
КППШ - 515	БКПТ - 5
КППШ - 715	БКПТ - 7

**Автоматические выключатели**

Заменяемый	Заменяющий
ВАТ - 48	ВАТ - 42, но в цепи
ВА 66-29Х	управления добавить
	выпрямитель ВА47-29
	ВА47-100
A3500, A 3600	A3700Р, A3700М

**Концевые и путевые выключатели**

Заменяемый	Заменяющий
БВК201	БВК 261
КВП 8	ПИП-8
ВПЧМ	ВКО
ВПЭ01	ВКВ
ВПК 4140	ВП 19
ПИЩ-6-1	ПИЩ-6-3

**Электромагниты**

Заменяемый	Заменяющий
ЭМЛК 04	ЭМ25
МТ	М34
ЭС	МИС

**Разъёмы**

Заменяемые	Заменяющие
ВКС	ВК
РПС	РП

**Охладители**

Заменяемый	Заменяющий
0331	0131

**Измерительные приборы**

Заменяемый	Заменяющий
М 325	М 381
Ф 4102/1	ЭСО-210/3
М 333К	Э А 3000 К

**Токосъёмники, гидротолкатели**

Заменяемый	Заменяющий
К 3212	ТКК-212
ТГМ 50	ТЭ 50

**Пакетные выключатели, переключатели**

Заменяемый	Заменяющий
ПКП	ПВП-11

**Трансформаторы**

Заменяемый	Заменяющий
ТШЛ377	ОСМ 1
ТП 313	ОСМ 1
ТСМ 1098	ТСУ
ТШЛ 393	ОСМ 1

**Контакторы**

Заменяемый	Заменяющий
КТУ 3 А	КМ 17 Р 33
КТУ 4 А	КМ 17 Р 35

**Командоаппараты и командоконтролеры**

Заменяемый	Заменяющий
ККП 1108	ККП 1108 А

# Памяти Юрия Алексеевича Сабинина

11 августа 2005 г. на 92 году жизни скончался заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем (Э и ПЭМС) Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, действительный член Международной энергетической академии Юрий Алексеевич Сабинин.

Ю.А. Сабинин по праву считается одним из основоположников ленинградской школы электромехаников. Еще в начале 60-х годов в соавторстве с В.П. Андреевым он подготовил и опубликовал книгу "Основы электропривода", являвшуюся долгие годы основным учебным пособием по теории электропривода как у нас в стране, так и за рубежом — книга переиздана в Польше, Венгрии, Китае и Болгарии.

Свою производственную деятельность Ю.А. Сабинин начал с работы электромонтером, совмещая её с учёбой в техникуме, затем учился на вечернем отделении Ленинградского политехнического института, после окончания которого в 1939 г. был оставлен в аспирантуре. Учёбу в ней прервала Великая Отечественная война. В годы войны и блокады Ю.А. Сабинин работал начальником лаборатории автомати-



ки в Ленэнерго и активно участвовал в восстановлении энергетического оборудования г. Ленинграда.

В 1946 г. Юрий Алексеевич возвратился в Политехнический институт, где прошёл путь от ассистента до заведующего кафедрой. Все эти годы профессор Ю.А. Сабинин совмещал преподавательскую деятельность в ЛПИ с руководством лабораторией, потом отделом в Институте электромеханики. Руководил работами по проектированию уникальных прецизионных электроприводов для астрофизических объектов, в том числе и для самого крупного в мире телескопа с шестиметровым зеркалом, за что был награждён

орденом "Знак Почёта" и Золотой медалью ВДНХ.

В 1967 г. профессор Ю.А. Сабинин был избран на должность заведующего кафедрой "Автоматика и телемеханика" Ленинградского института точной механики и оптики, которую он возглавлял более 20 лет.

В 1995 г. Юрий Алексеевич Сабинин перешёл на кафедру ЭТ и ПЭМС для постановки и преподавания специальных курсов: "Электрические машины", "Основы электропривода" и "Прецизионные следящие системы оптических комплексов".

Ю.А. Сабинин воспитал многочисленные кадры высококвалифицированных инженеров, научных работников, через аспирантуру и соискательство им подготовлено 44 кандидата и 3 доктора технических наук. Огромная общественно-научная работа являлась отличительной чертой Юрия Алексеевича. Он непрерывный организатор и активный участник всех крупных научных мероприятий в области автоматики промышленных установок, автор 20 книг и учебников, более 200 научных трудов и изобретений.

Память о крупном учёном, труженике, чутком товарище, наделённом лучшими человеческими качествами, навсегда сохранится в наших сердцах.

# Памяти Михаила Константиновича Захарова (1920-2005)

3 августа 2005 г. после тяжёлой болезни скончался заслуженный работник народного образования Украины, доктор технических наук, профессор Михаил Константинович Захаров.

Уроженец с. Караул Тамбовской области Михаил Константинович сразу после поступления в 1941 г. на электротехнический факультет Ленинградского политехнического института ушёл добровольцем на фронт. После тяжёлого ранения и лечения в 1944 г. он поступил в Московский энергетический институт. По окончании аспирантуры и успешной защиты кандидатской диссертации Михаил Константинович Захаров был направлен в Одесский политехнический институт.

Здесь начался самый плодотворный этап жизни Михаила Константиновича. С 1956 по 1973 гг. он возглавлял кафедру электрических машин. В основном благодаря его энергии и настойчивости кафедра стала профилирующей. Уже в 1965 г. состоялся первый выпуск инженеров-электромехаников по специальности "Электрические машины и аппараты". Интенсивно развивались связи с предприятиями электромашиностроения, создавались учебная и научно-исследовательская лабораторные базы кафедры. В 1969 г. с вводом в строй нового корпуса была обновлена и модернизирована учебная лаборатория.



В 1960 г. создана Отраслевая лаборатория низкоскоростных и специальных двигателей Министерства электротехнической промышленности СССР. В 1961 г. при кафедре открылась аспирантура, явившаяся настоящей кузницей научных кадров в области электрических машин. Укреплялись научно-педагогические связи кафедры с коллегами из других городов страны благодаря активному участию Михаила Константиновича в работе методического совета при Минвузе СССР. Две таких встречи проводились на базе Одесского политехнического института, причём непосредственным организатором первой из них был М.К. Захаров.

Михаил Константинович Захаров – известный ученый-электромеханик, автор 157 научных работ, 29 авторских свидетельств и 5 иностранных патентов, бессменный научный руководитель Отраслевой лаборатории. Под его руководством были разработаны пер-

вые отечественные серии редукторных электродвигателей, получившие награды на Выставке достижений народного хозяйства СССР. Работники руководимой им Отраслевой лаборатории участвовали в модернизации многоскоростных модификаций последних серий асинхронных двигателей, созданных в СССР. Михаил Константинович – основатель научной школы, питомцами которой являются 3 доктора и 9 кандидатов технических наук.

Михаила Константиновича всегда отличали заботливое отношение к людям и активная гражданская позиция. Он никогда не смирялся с несправедливостью и, на каком бы уровне она не проявлялась, всегда принципиально с ней боролся. Будучи заведующим кафедрой и деканом он был всегда открыт для общения. Как всякого талантливого человека, Михаила Константиновича отличала многогранность интересов: он прекрасно разбирался в изобразительном искусстве и сам писал маслом, любил и понимал классическую музыку, прекрасно воспринимал юмор, не чурался и спорта, до 50 лет играя в волейбол.

Коллектив кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета и многочисленные ученики Михаила Константиновича Захарова навсегда сохранят в своих сердцах светлую память об этом замечательном человеке.

# Памяти Сакае Ямамура

7 июня 2005 г. в возрасте 87 лет скончался широко известный учёный в области электротехники и электрических машин, действительный член Академии наук Японии, Почётный член Российской международной электротехнической академии, профессор, доктор наук Сакае Ямамура.

В 1941 г. С. Ямамура получил диплом бакалавра наук, в 1941–1945 гг. служил офицером технического отряда Военно-морского флота Японии. В послевоенные годы он продолжил научную карьеру и защитил в США магистерскую (1951 г.), а вскоре и докторскую (1953 г.) диссертации. С 1946 по 1978 гг. его научная и преподавательская деятельность была неразрывно связана с университетом родного города Токио. В 1956 г. в этом университете он получил диплом доктора электротехники, стал профессором и заведующим кафедрой электрических машин. С 1978 по 1985 гг. он возглавлял кафедру электрических машин в Национальном университете г. Иокогама. В течение 10 лет (1983–1993 гг.) профессор Ямамура являлся вице-президентом Центрально-го научно-исследовательского института электроэнергетики, возглавляя научно-исследовательские проекты по электроснабжению Японии. С 1993 по 1997 гг. он был главным советником в этом институте. В 1988 г. профессор Ямамура избран в члены Академии наук Японии.



По результатам научных исследований им опубликовано более 150 работ, включая 4 монографии, две из которых были переведены на русский язык и изданы в нашей стране под следующими названиями: "Теория линейных асинхронных двигателей" (Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1983) и "Сpirально-векторная теория электрических цепей и машин переменного тока" (СПб.: МЦЭНТ 1993). Для многих отечественных специалистов эти работы стали настольными книгами, а отдельные их разделы введены в курсы лекций для студентов ряда технических вузов. Научные достижения С. Ямамуры были по достоинству оценены как в самой Японии, так и за рубежом, где он неоднократно становился лауреатом многих почетных наград и премий, включая золотые медали имени Тесла и имени Ламмэ, учреждённые международным институтом IEEE.

О большом объёме научно-организационной деятельности свидетельствует перечень занимаемых С. Ямамура должностей: президент института инженеров электриков (IEE) Японии (1975–1976 гг.), президент Ассоциации электротехнологий (1982–1986 гг.), президент Комиссии электротехнических стандартов IEE Японии (1981–1998 гг.), глава японских делегаций (1978–1988 гг.), участвовавших в работе МЭК (IEC).

Начиная с 1977 г. (с участия в Международном электротехническом конгрессе в Москве) С. Ямамура много-кратно посещал нашу страну. Восемь его визитов были связаны с Санкт-Петербургом, где он активно участвовал во многих научно-технических конференциях, семинарах и дискуссиях, посетил ведущие электротехнические предприятия и вузы города.

Сакае Ямамура сохранится в памяти людей как учёный высокого международного уровня, много сделавший для научно-технического прогресса, как личность с разносторонними интересами и культурными традициями Востока и Запада и в тоже время как скромный дружелюбный человек с мягким отзывчивым характером и доброжелательным отношением к нашей стране.

# ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» В 2005 Г.

«40 лет ОАО “НИПТИЭМ” .....	5	2	Кравчик А.Э., Кругликов О.В., Лазарев М.В., Русаковский А.М. Перспективы разработки и производства стандартных асинхронных электродвигателей на предприятиях группы компаний “ВЭМЗ” .....	5	3
Кочетков В.Д. 75 лет журналу «Электротехника» .....	1	2	Кругликов О.В., Зайцев А.М., Драгомиров М.С., Вершинин А.В., Сижанов И.С. Опыт практического применения комплекса Pro/ENGINEER в автоматизированном проектировании .....	5	14
ОАО “Электропривод” – 60 лет после Великой победы .....	4	2	Мещеряков В.Н., Петунин А.А. Структурно-тополо-гический анализ моделей вентильного индукторного и асинхронного двигателей .....	7	9
Петрова Е.В. Промышленной группе “Таврида Электрик” 15 лет .....	10	3	Пискунов С.В., Ворошилов В.С., Поляков В.А. Тяговые асинхронные двигатели для приводов подвижного состава городского электротранспорта .....	5	32
Поздравления журналу .....	1	4	Решмин Б.И. Уточнённая модель асинхронного двигателя как объект для построения системы управления .....	7	14
Шанцев В.П. Коллективу журнала “Электротехника” .....	2	2			
<b>ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ</b>					
Афонин В.И. Виброшумоактивность двигателей привода лифтов .....	5	28			
Афонин В.И. Выбор числа пазов двигателей привода лифтов .....	5	24			
Белассел Моханд-Тахар, Беспалов В.Я., Шетат Бухемис. Ёмкостные параметры и перенапряжения в обмотке асинхронного двигателя питаемого от ШИМ-преобразователя .....	1	44			
Вайнер Г.А., Строганов Б.Г. Регулируемый синхронный двигатель в системе с частотной и фазовой обратными связями .....	6	3			
Васильченко В.А., Вершинин А.В., Зайцев А.М., Сижанов И.С. Трёхфазные асинхронные двигатели специальных конструктивных исполнений для комплектных частотно-регулируемых приводов .....	5	42			
Вилькин М.А., Семёнов Ю.И., Никифоров Ю.Н. Повышение надёжности работы низковольтных микромашин с нормированным напряжением трогания .....	6	10			
Вилькин М.А., Семёнов Ю.И., Никифоров Ю.Н. Разработка и модернизация производства щёток для электрических машин малой мощности .....	2	51			
Ворошилов В.С., Голембовский М.И., Жиров В.В., Пискунов С.В. Асинхронные двигатели для оборудования АЭС .....	5	34			
Глинка Т.Я., Якубец М.С. Диагностика изоляции обмоток электрических машин постоянным током .....	7	20			
Дмитриев Б.Ф., Черевко А.И., Гаврилов Д.А. К вопросу о построении универсальной математической модели обобщённой электрической машины в программной среде MatLab-Simulink .....	7	3			
Епифанов О.К., Салова И.А., Хрущев В.В. Трёхфазные бесконтактные моментные индукторные двигатели с подмагничиванием постоянным магнитным полем .....	1	30			
Епифанов О.К. Современный ряд высокомоментных двигателей для безредукторных следящих систем: результаты разработки и производства .....	2	36			
Захаренко А.Б. Проектирование погружного электродвигателя с сосредоточенной обмоткой статора .....	1	39			
Кобелев А.С. Эффективность использования фреймового представления знаний для организации интеллектуальных САПР электрических машин .....	5	18			
Кобелев А.С. Агентно-ориентированное программирование как реализация фреймового представления знаний об электрической машине в интеллектуальных САПР ..	5	8			
Коршунов Г.М., Дербенёв В.А., Степанов В.П., Бороха И.К., Семёнов Ю.И., Кравчук Л.Н. Поиск оптимальных решений в конструкции щёток электрических машин .....	2	48			
Коршунов Г.М., Дербенёв В.А., Степанов В.П., Бороха И.К. Некоторые проблемы производства щёток электрических машин и пути их разрешения .....	2	56			

<b>Захаренков А.В. Применение частотно-регулируемых электроприводов тягодутьевых механизмов и питательного насоса в АСУ ТП котла ТЭЦ</b> .....	8	60		
<b>Зюзев А.М., Нестеров К.Е. К построению бездатчикового электропривода системы ТПНАД</b> .....	9	38		
<b>Иванов А.Г., Сергеев А.Г. Особенности динамики тиристорного электропривода при малых угловых скоростях вращения</b> .....	11	56		
<b>Ишматов З.Ш. Обеспечение грубости при синтезе цифровых систем управления электроприводом</b> .....	9	27		
<b>Ишматов З.Ш., Волков М.А., Плотников Ю.В. Принципы построения и методы синтеза цифровых регуляторов внешних контуров электропривода</b> .....	9	62		
<b>Козярук А.Е., Рудаков В.В. Математическая модель системы прямого управления моментом асинхронного электропривода</b> .....	9	8		
<b>Колоколов Ю.В., Косчинский С.Л. Механизмы потери устойчивости стационарными процессами в асинхронном электроприводе с векторным управлением</b> .....	9	33		
<b>Кузнецов Ю.П., Бирюков А.В., Карпова Г.В., Прокопьева Л.А., Лиморенко П.М., Никифоров Е.А., Тескин Б.А., Рябинин Б.В., Тарасов С.В. Модернизированная система управления электрооборудованием перегрузочной машины ПМ230 реактора ВВЭР-440 Кольской АЭС</b> .....	12	51		
<b>Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Обобщение задач оптимизации установившихся режимов электрических двигателей</b> .....	9	18		
<b>Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Динамические характеристики асинхронного электропривода с векторным управлением</b> .....	1	11		
<b>Решмин Б.И. Исследование динамических процессов в электроприводе с синхронным двигателем при векторном управлении</b> .....	11	59		
<b>Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Сокунов Б.А. Формирование режимов работы линейного индукционного магнитогидродинамического насоса</b> .....	9	58		
<b>Хашимов А.А., Гуляганов М.М. Решение оптимизационных задач высокочастотного автоматизированного электропривода методом Ньютона-Рафсона с расширенной областью применения</b> .....	1	15		
<b>Шабаев В.А. Анализ источников шума вентильно-индукторного двигателя</b> .....	5	62		
<b>Шабаев В.А., Лазарев М.В., Захаров А.В. Алгоритмы управления вентильно-индукторным электроприводом, обеспечивающие уменьшение неравномерности электромагнитного момента</b> .....	5	54		
<b>Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А., Мухаматшин И.А. Релейное управление активными токовыми преобразователями частоты</b> .....	9	47		
<b>СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА</b>				
<b>Глебов С.С., Жуликов А.И., Фоменко Ю.Л. Современные тенденции развития элементной базы силовой электроники и состояние разработок на "Воронежском заводе полупроводниковых приборов"</b> .....	8	33		
<b>Данцев О.Н., Громов В.И. ЗАО "Группа-Кремний": развитая собственная материальная база гарантия технологической и экономической независимости предприятия</b> .....	8	29		
<b>Исаев В.М., Суслов В.М., Степанов Ю.И., Майоров С.И., Тарасов В.П. Основные направления развития специальной электротехники на период до 2015 г.</b> .....	8	42		
<b>Истомин Е.В., Критенко М.И., Флоренцев С.Н., Яковлев Е.Н. Силовые полупроводниковые модули специального назначения</b> .....	11	24		
<b>Ковалев В.Д., Евсеев Ю.А., Сурма А.М. Элементная база силовой полупроводниковой электроники в России. Состояние и перспективы развития</b> .....	8	3		
<b>Критенко М.И., Исаев В.М., Степанов Ю.И. Программа развития специальной электроэнергетики на период до 2015 г.</b> .....	11	16		
<b>Крымко М.М. Элементы силовой электроники</b> .....	8	23		
<b>Лазарев Г.В. Мощные высоковольтные преобразователи частоты для регулируемого электропривода в электроэнергетике</b> .....	11	3		
<b>Терехов В.Ф., Хныков А.В. Анализ работы мостового конвертора с резонансным переключением ключей и фазоимпульсным управлением для построения высокоэффективных импульсных источников вторичного электропитания</b> .....	8	53		
<b>Черевко А.И., Гаврилов Д.А. Математическая модель автономного инвертора с трансформатором врачающегося магнитного поля в Matlab-Simulink</b> .....	11	31		
<b>Черевко А.И., Казакевич А.И., Семёнов Д.Н. Схемотехническая модель инвертора с трансформатором врачающегося магнитного поля в MICRO CAR 7</b> .....	11	40		
<b>Чибиркин В.В., Гейфман Е.М., Елисеев В.В., Мартыненко В.А., Сурма А.М. Создание и освоение производства нового поколения мощных тиристоров и диодов для энергоёмких областей промышленности, энергетики и транспорта</b> .....	8	37		
<b>Шавёлкин А.А. Вариант схемы многоуровневого преобразователя частоты для электропривода среднего напряжения</b> .....	11	9		
<b>ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА</b>				
<b>Джумаев С.Д. Разработка и ввод в эксплуатацию нового поколения информационно-измерительной системы "СКАЛА-МИКРО"</b> .....	6	18		
<b>ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ТЕХНИКА</b>				
<b>Аношин О.А., Никулов И.И. Идентификация повреждённого фидера при однофазном замыкании на землю в распределительных сетях 610 кВ с изолированной нейтралью</b> .....	10	40		
<b>Белкин Г.С. Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов обладающих "интеллектом") для коммутации цепей высокого напряжения</b> .....	12	3		
<b>Верещагин И.П., Матвеев Д.А., Поблагуев И.А. Методика расчёта показателей эффективности применения подвесных ОПН для повышения грозоупорности воздушных линий электропередачи</b> .....	10	31		
<b>Власов А.Б. Факторный анализ результатов тепловизионного контроля высоковольтных вводов с твёрдой изоляцией</b> .....	2	3		
<b>Волкова О.В., Годулян В.В., Корявин А.Р., Остапенко Е.И., Трифонов В.З. Электрическая прочность линейных полимерных изоляторов для линий электропередач высокого и сверхвысокого напряжения</b> .....	12	19		
<b>Грачёв П.Ю., Костырев М.Л., Мягков Ф.Н., Кунцевич П.А. Многообмоточные преобразователи энергии для автономных объектов</b> .....	12	24		
<b>Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Швец И.С. О повышении удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов</b> .....	12	47		

Дизендорф Э.А. Мостовой инвертор с переключающими нелинейными дросселями и одним полупроводниковым ключом .....	12	33
Ивакин В.Н. Внешние характеристики устройств гибких передач переменного тока и их влияние на характеристики мощности управляемых линий электропередачи переменного тока .....	12	10
Кирсанов А.В. Оценка износа контактов силового коммутационного оборудования постоянного тока .....	2	22
Литовкин Г.И., Орлов А.И., Третьяков А.Н. Средства улучшения качества электрической энергии на сельскохозяйственных предприятиях .....	12	29
Лоханин А.К., Бушуев С.А., Матвеев Д.А., Рабинович В.Л. Особенности перенапряжений, возникающих при отключении печных трансформаторов вакуумными выключателями .....	10	26
Максимов Б.К., Воротницкий В.В. Оценка эффективности автоматического секционирования воздушных распределительных сетей 610 кВ с применением реклоузеров с целью повышения надёжности электроснабжения потребителей .....	10	7
Михеев Г.М., Федоров Ю.А., Михеев Г.М. Оперативная диагностика контактора быстродействующего регулятора силового трансформатора .....	12	41
Перцев А.А., Ляшенко В.Д., Рыльская Л.А. Опыт модернизации воздушного выключателя путём замены воздушных дугогасительных камер на вакуумные .....	2	16
Поливников П.М. БКТПБ серии «Неман» современные городские подстанции европейского уровня .....	10	56
Ромочкин Ю.Г., Лукацкая И.А. Исследование коммутационного ресурса вакуумных дугогасительных камер с аксиальным магнитным полем .....	2	9
Темников А.Г. К вопросу моделирования отрицательного лидера в воздухе .....	10	46
<b>ЭЛЕКТРОАППАРАТЫ</b>		
Горелов В.Н., Матлакова И.Б., Пономаренко С.А. Пре- дохранитель-разъединитель с ручным управлением ...	10	22
<b>ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ</b>		
Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Шатов В.А. Электротепловая модель коаксиальной индукционно-резистивной системы нагрева .....	1	48
<b>ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b>		
Азизов А.Ш., Костельев А.М., Андреев А.М., Папков А.В., Пак В.М. Влияние химического состава пропитанных слюдосодержащих лент на электрические характеристики корпусной изоляции высоковольтных электрических машин .....	3	2
Березинец Н.И., Украинский Ю.М., Захаров В.И., Омельченко В.П. Некоторые направления совершенствования систем изоляции тяговых электрических машин .....	3	6
Борисова М.А., Галюков О.В., Полонский Ю.А., Цацын- кин П.В. Изменение проводимости полимерной плёнки в структуре многослойной изоляции электрических машин в процессе её изготовления .....	3	26
Ваксер Б.Д., Пищулина О.П. О стандартизации испытаний на электрическое старение высоковольтной статорной изоляции .....	3	14
Ваксер Н.М., Зволинская А.Ю., Лаврентьева М.Ю., Сажин Б.И., Старовойтенков В.В. Использование дизлек- трометрии для оценки технологических характеристик термореактивных компаундов .....	3	16
Глинка Т.Я., Якубец М.С. Классификация степени старения изоляции обмоток электрических машин .....	3	60
Драчёв А.И., Пак В.М. Короностойкий дизлектрический материал на основе полиимидной плёнки .....	3	52
Кокцинская Е.М., Ваксер Б.Д., Гегенава А.Г., Полонский Ю.А. Разработка покрытия ленточного типа для предотвращения краевых разрядов в изоляции электрических машин высокого напряжения .....	3	22
Левин С.М., Лавкин Н.Е., Ножевникова Т.Е., Казакова Н.Ю. Высоконагревостойкие системы изоляции тяговых электродвигателей для электроповижного состава ..	3	10
Масляков С.А., Полонский Ю.А. Компьютерный расчёт дизлектрической проницаемости материалов при измерениях волноводным методом в диапазоне СВЧ ..	3	30
Папков А.В., Мельниченко А.П., Пак В.М., Куимов И.Е. Новые электроизоляционные материалы для систем изоляции турбо-, гидрогенераторов и тяговых двигателей ..	3	34
Петров В.В., Погодина Ж.П., Пищулина О.П., Гусева Е.А. Система изоляции Элмикатор для статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов .....	3	47
Фёдорова С.С., Драчёв А.И., Гильман А.Б., Пак В.М. Влияние тонкого слоя, нанесённого методом ионно- плазменного осаждения из паров циклогексана, на электрическую прочность плёнки ПЭТФ .....	3	41
Хаймович Л.Л. Компактная сборка лобовых частей обмотки статора турбогенераторов с изоляцией Resin Rich ..	3	55
<b>ТРАНСФОРМАТОРЫ И МАГНИТНО- СВЯЗАННЫЕ СИСТЕМЫ</b>		
Архипов А.С. Расчёт добавочных потерь от циркулирующих токов в обмотках низшего напряжения распределительных трансформаторов .....	4	16
Иванченко О.Н., Кохан П.Г., Коваль В.В., Семчук Г.О., Эндик В.А. К расчёту гармонического состава тока холостого хода трансформатора .....	4	22
Мятач С.В., Ворфоломеев Г.Н., Евдокимов С.А., Щуров Н.И. Расчёт установленных мощностей обмоток трансформаторных преобразователей числа фаз для многопульсных выпрямителей .....	4	28
Сотников В.В. Условие подобия основных полей магнитно-связанных контуров .....	4	3
Федосов Л.Л. Расчёт мостовой схемы замещения магнитной цепи электрического реактора с продольно-поперечным подмагничиванием .....	4	37
Черевко А.И., Семёнов Д.Н., Казакевич А.И. Схемотехническая модель выпрямителя с трансформатором вращающегося магнитного поля в Micro-Cap 7 .....	4	8
<b>КОНДЕНСАТОРОСТРОЕНИЕ</b>		
Андреев А.М., Хаецкий В.С. Электрическая прочность пропитанного металлизированного плёночного дизлектика ..	7	61
<b>ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ</b>		
Агунов М.В., Агунов А.В., Вербова Н.М. Определение составляющих полной мощности в электрических цепях с несинусоидальными напряжениями и токами методами цифровой обработки сигналов .....	7	45

Адыгезалов В.С. Индуктивный соленоидный преобразователь перемещений .....	7	37
Архипов А.С. Расчёт объёмно-компенсирующей способности гофрированных баков герметичных трансформаторов .....	1	53
Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости .....	7	25
Баюнов В.В., Подалинский Ю.А., Кривченко Г.В. Тепловые процессы в герметизированном свинцовом аккумуляторе .....	6	37
Волохов С.А., Добродеев П.Н. Экранирующие свойства проводящих цилиндров конечной длины с ферромагнитными поясами .....	7	41
Кириенко В.П., Стрелков В.Ф. Регулятор напряжения импульсного источника электропитания радиолокационной станции .....	7	49
Копылов И.П. Энергетический кризис и проблема чистой воды .....	1	61
Копылов С.И. Секционирование сверхпроводящих токоограничивающих устройств .....	6	44
Кузнецов В.А., Николаев В.В. Стратегия проектирования вентильно-индукторного стартёр-генератора .....	4	46
Морозов В.А., Михеев Г.М. Простой расчёт поперечного сечения электрического провода на низких и высоких частотах .....	4	54
Нархинов В.П., Цыренжапов Б.Б. Измерение параметров сходящихся пучков электронов устройством врачающегося цилиндра Фарадея .....	6	40
Плохов И.В. Модель динамики токопередачи через скользящий контакт .....	2	28
Размыслов В.А., Герасименко Т.В. Определение активного сопротивления короткозамкнутой обмотки коробчатой формы .....	4	51
Размыслов В.А., Сериков А.В., Герасименко Т.В. Массогабаритные показатели электрорадиаторов трансформаторного типа .....	6	34
Рыбаков Ю.В. Новые свойства металлических кабельных оболочек .....	2	34
Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Электроэрозионная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий .....	6	25
Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. О предельной глубине обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще полупроводящей среды .....	6	48
Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н., Меркушин Ю.М., Востриков Д.В. Антенно-контактный метод обнаружения локальных объектов в укрывающих средах .....	7	33

## НАУЧНЫЕ ГИПОТЕЗЫ

Юркевич В.М. Распределённая электромагнитная модель электрона и устойчивость его дискретных состояний, как следствие волнового описания классической физики .....	6	53
---	---	----

## ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Демидович А.А., Никоненко В.А. Особенности применения термоэлектрических преобразователей и термометров сопротивления .....	7	55
Зекцер Д.М. О замене низковольтных электротехнических аппаратов .....	7	58
Зекцер Д.М. О замене низковольтных электротехнических аппаратов .....	12	56
Морозов В.А. Особенности расчёта контура третьего вида, используемого в нагрузочных системах высокочастотных технологических установок .....	2	59

## ХРОНИКА

Альтов В.А. Международной Академии электротехнических наук 10 лет .....	1	61
В Академии электротехнических наук РФ .....	4	60
Вячеслав Семёнович Тулин (к 100-летию со дня рождения) .....	2	65
Итоги V Международной конференции по электротехническим материалам и компонентам "МКЭМК-2004" .....	1	59

## ИНФОРМАЦИЯ

Юренко И.К. Сертификационный центр ОАО "ВЭлНИИ" .....	1	63
---	---	----

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Александр Борисович Кувалдин .....	12	65
Виктор Миронович Нейман .....	3	65
Ольгерд Владиславович Слежановский (к 85-летию со дня рождения) .....	7	65

## НЕКРОЛОГИ

Светлой памяти Эвальда Акимовича Лодочникова .....	4	63
Борис Иосифович Моцхейн .....	4	64
Андроник Гевондович Иосифьян .....	6	62
Теодор Зиновьевич Портной .....	11	65
Юрий Алексеевич Сабинин .....	12	58
Памяти Михаила Константиновича Захарова .....	12	59
Памяти Сакае Ямамура .....	12	60

## Александр Борисович Кувалдин (к 70-летию)

Доктору технических наук, профессору Московского энергетического института Александру Борисовичу Кувалдину исполнилось 70 лет. Его инженерная, научная и педагогическая деятельность связана с развитием электротермии и электротехнологии.

В 1953 г. А.Б. Кувалдин окончил школу с золотой медалью и поступил на факультет "Электрификации промышленности и транспорта" (ЭПТФ) МЭИ, избрав специальность "Электротермические установки" (ЭТУ). В 1959 г. он получил диплом с отличием и начал работать инженером конструкторского отдела завода "Платиноприбор". Принимал участие в разработке, изготовлении и пуске в эксплуатацию лабораторного электротермического оборудования (высокочастотных установок для бестигельной зонной плавки полупроводниковых материалов, высокотемпературных вакуумных электропечей сопротивления и др.).

В 1961 г. А.Б. Кувалдин поступил в аспирантуру МЭИ, где проводил исследования режимов работы дуговых плазмотронов и по этой тематике в 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию. Учёбу в аспирантуре он успешно совмещал с педагогической работой (читал лекции по курсу "Высокочастотный нагрев"), что и определило дальнейшее направление его работы в коллективе кафедры ЭТУ – ассистент, доцент, а с 1990 г. и по настоящее время профессор кафедры "Физика электротехнических материалов и автоматизация электротехнологических комплексов" МЭИ.



В 1988 г. А.Б. Кувалдин защитил докторскую циссертацию, посвящённую исследованию устройств индукционного нагрева ферромагнитной стали.

Александр Борисович инициатор широкого использования достижений вычислительной техники для исследования процессов индукционного нагрева и разработки нагревательных устройств промышленного назначения. Широк круг его научных интересов: низкотемпературный нагрев ферромагнетиков, использование криогенного охлаждения в мощных индукционных и дуговых установках, компьютерное моделирование электротермических устройств и процессов, применение токов сложной формы в ЭТУ, разработка скоростных режимов индукционного нагрева с учётом термических напряжений в нагреваемых деталях.

Результаты многих исследований и разработок А.Б. Кувалдина, выполненных совместно с промышленными предприятиями и научно-исследо-

вательскими организациями (ЗИЛ, Ступинский металлургический комбинат, заводы железобетонных изделий, оборонные заводы, ВНИИЭТО, ВПКТИтяжмаш, ЦНИТИМ и др.), успешно внедрены в производство.

По результатам научно-исследовательской и учебно-педагогической работы им опубликовано свыше 300 трудов: монографии, учебные пособия, справочники, статьи в журналах "Электротехника", "Электричество", "Электротермия" и "Электрометаллургия", публикации за рубежом, патенты и авторские свидетельства. Разработки индукционных устройств, выполненные в 2002 и 2003 гг. были отмечены бронзовой и серебряной медалями ВВЦ.

Под его руководством и при его консультации защищены 12 кандидатских и 1 докторская диссертации.

А.Б. Кувалдин является действительным членом АЭН РФ, членом двух Диссертационных советов (МЭИ и Чувашского университета), членом редакционных коллегий "Электротехнической энциклопедии", издаваемой АЭН, и журнала "Электрометаллургия".

Высококвалифицированный специалист, А. Б. Кувалдин достойно представляет Российскую электротермию за рубежом, принимая участие в различных международных конференциях в качестве члена научных комитетов и докладчика.

Редакционная коллегия журнала "Электротехника" сердечно поздравляет юбиляра и желает здоровья, счастья и творческого долголетия.

## УВЕДОМЛЕНИЕ (ПРИГЛАШЕНИЕ)

Совет директоров Открытого акционерного общества «Электропривод» (место нахождения: 107078, г. Москва, ул. Садовая - Спасская, д. 1/2, стр. 5) уведомляет своих акционеров о проведении внеочередного общего собрания акционеров.

Собрание состоится 01 марта 2006 г. в 14 часов в помещении по адресу: г. Москва, ул. Садовая Спасская, д. 1/2, корп. 3, конференц-зал. Начало регистрации лиц, участвующих в собрании, – 13 часов.

Дата составления списка лиц, имеющих право на участие в собрании, – 12 января 2006 г.

Срок подачи предложений о выдвижении кандидатов в ревизионную комиссию общества – до 30 января 2006 г.

### Повестка дня:

1. Избрание ревизионной комиссии Общества.

Материалы по подготовке внеочередного собрания акционеров публикуются на стенде Общества по месту его нахождения.