

er

ISSN 0013-5860



**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**  
**7 2008**



МЕДАЛЬ  
"ЗА ЗАСЛУГИ В  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сдано в набор 05.05.2008. Подписано в печать 05.06.2008 Формат 60x88 1/8  
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 153  
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», 2008 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека  
[www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

- Малафеев С.И., Захаров А.В.** Исследование потерь в асинхронном двигателе с частотным регулированием при переходных процессах..... 2
- Костырев М.Л., Джендубаев А-З.Р.** Электрическая мощность серийного асинхронного двигателя при его использовании в качестве асинхронного генератора..... 6
- Андрианов М.В., Кругликов О.В., Родионов Р.В.** Разработка и внедрение системы управления напряжением синхронных генераторов ..... 10
- Белассел Моханд-Тахар, Беспалов В.Я.** Волновые параметры и межвитковые перенапряжения в многовитковой выпнной обмотке асинхронного двигателя, питаемого от ШИМ-преобразователя. 14
- Авилов В.Д., Попов Д.И.** Коммутация в машинах постоянного тока с катящимся токо съёмом ..... 18

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Гуслин Ю.П.** Коммутации тиристоров в схемах релейно-импульсного регулирования переменного напряжения ..... 22
- Шевлюгин М.В.** Энергосберегающие схемы тягового электроснабжения железных дорог на базе сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии..... 28
- Кошелев К.С., Пешков М.В.** Выбор параметров статического компенсатора реактивной мощности типа СТАТКОМ ..... 34
- Бродский Ю.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В.** Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе ёмкостных накопителей энергии ..... 38

## УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЗАЩИТЫ

- Минуллин Р.Г., Петрушенко Ю.Я., Фардиев И.Ш.** Зондирование воздушных линий электропередачи локационным методом..... 42
- Манусов В.З., Михеев П.А.** Математическая модель электромагнитного переходного процесса в электрической сети, содержащей сверхпроводниковый токоограничитель индуктивного типа..... 50

## ЭЛЕКТРОПРИВОД

- Махмуд Бассам, Сафонов Ю.М.** Формирование траектории движения промышленного робота на базе искусственной нейронной сети..... 57

## КОНДЕНСАТОРЫ СИЛОВЫЕ

- Гунько В.И., Онищенко Л.И., Гребенников И.Ю., Дмитришин А.Я., Топоров С.О.** Исследование влияния повышенных температур и давления на электрическую прочность полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом ..... 59

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ

- Придубков П.Я.** О влиянии параметров массивного ферромагнитного тела на характеристики его магнитного поля ..... 62

## ELECTRIC MACHINES

- Malafeev S.I., Zaharov A.V.** Research of losses in the induction motor with frequently control at transients .. 2
- Kostyrev M.L., Dzhendubaev A-3.P.** Electric output power of the serial induction motor at use as the induction generator ..... 6
- Andrianov M.V., Kruglikov O.V., Rodionov R.V.** Development and introduction of a control system by a voltage of synchronous generators ..... 10
- Belassel Mohand-Tahar, Bepalov V.Y.** High frequency parameters and voltage surges between the whorls of flexible winding to several winding of induction motors, fed by PWM ..... 14
- Avilov V.D., Popov D.I.** Commutation in the direct current machines with rolling current collecting ..... 18

## CONVERTER TECHNIQUE

- Guslin Yu.P.** Switching thyristor in scheme relay-type-pulsed regulation of the variable voltage ..... 22
- Shevlyugin M.V.** The circuits of saving of energy of traction power supply railroad of the superconducting magnetic energy storage ..... 28
- Koshelev K.S., Peshkov M.V.** Static induction motor at its use the induction ..... 34
- Brodskiy Yu.A., Podaruev A.I., Pupynin V.N., Shevlyugin M.V.** Stationary system to storage energy deceleration electric train of the underground railway on base of the capacitive drives to energy ..... 38

## SWITCHGEAR, CONTROL AND PROTECTION DEVICES

- Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiyev I.Sh.** The probing of electricity transmission lines by location method ..... 42
- Manusov V.Z., Miheev P.A.** Mathematical model of the electromagnet transient in power circuit comprising superconducting fault current limiter ..... 50

## ELECTRIC DEVICES

- Mahmoud Bassam, Safonov Yu.M.** Formation of industrial robot trajectory based on artificial neural network ..... 57

## POWER CAPACITORS

- Gun'ko V.I., Onichshenko L.I., Grebennikov I.Yu., Dmitrishin A.Ya., Toporov S.O.** Research of influencing of heightened temperatures and pressure on electric strength of polymethylsyloxane liquid PMS-20 and castor oil, saturated by elegas ..... 59

## RESEARCH AND DEVELOPMENT

- Pridubkov P.Ya.** About the influence of massive ferromagnetic body parameters on its magnetic field characteristics ..... 62

## Исследование потерь в асинхронном двигателе с частотным регулированием при переходных процессах

МАЛАФЕЕВ С.И., ЗАХАРОВ А.В.

*Приведены результаты исследования и моделирования электроэнергетических процессов в асинхронном двигателе в переходных режимах при различных способах управления. Показано, что векторное управление обеспечивает минимальные потери при пуске двигателя. Рассмотрено влияние параметров регулятора частоты вращения на потери в переходных режимах.*

*At present the results of research and modelling of electropower processes in the induction motor and driver in transitive modes are resulted at various ways of control. It is shown, that vector speed control provides the minimal power losses at start-up of the motor. Influence of parameters of a speed regulator on power losses in transitive modes is considered.*

Энергетика динамических режимов электроприводов подробно изучена для различных случаев пуска и торможения двигателей без влияния регулирующих устройств [1]. Однако при проектировании мехатронных систем особый интерес представляет исследование зависимости электроэнергетических процессов от структур и параметров регулирующих устройств [2].

В результате переходных процессов в электроприводах происходят разгон, торможение, реверсирование, нагружение двигателей. При этом выполняется механическая работа; изменяется кинетическая энергия движущихся масс; преобразуется электрическая энергия в тепловую; рекуперируется энергия и преобразуется в элементах питающей сети. Разнообразие режимов работы мехатронных систем и разное содержание полезной работы в каждом случае не позволяет сформулировать для них единый универсальный критерий энергетической оптимизации.

В настоящей работе выполнено исследование зависимостей потерь в переходных режимах асинхронного электропривода от типа и параметров регуляторов частоты вращения.

В качестве объекта исследования были выбраны три типа электрических двигателей, характерных для линейки мощностей низковольтных машин переменного тока: 5A80MA4 (1,1 кВт); 5A225M4 (55 кВт); 5AM315MB2 (250 кВт).

Для решения поставленной задачи использовалось компьютерное моделирование на осно-

ве модели асинхронного электропривода, разработанной в ОАО "НИПТИЭМ" [3]. В этой модели асинхронный двигатель представлен в трёхфазных неподвижных координатах, учтены эффекты насыщения магнитной цепи и вытеснения тока в роторе, нагрузка представлена односторонней моделью, в системе управления предусмотрено моделирование вольт-частотного и трансвекторного способов управления частотой вращения.

Энергетические процессы исследовались при пуске асинхронного двигателя в режиме холостого хода и при вентиляторной нагрузке. Приведенный момент инерции нагрузки принимался равным  $J_n = 4J_d$ , где  $J_d$  – момент инерции двигателя.

Для выполнения сравнительного анализа процессов при различных способах управления рассматривались процессы одинаковой длительности, равной времени переходного процесса при прямом пуске двигателя.

Переходные процессы в асинхронном двигателе при прямом пуске, при частотном пуске со скалярным и векторным управлением показаны соответственно на рис. 1–3. При векторном управлении (рис. 3) на интервале времени  $t = 0 \div 0,2$  с происходит намагничивание машины, которое в расчётах энергетических процессов не учитывается.

На основе результатов моделирования получены интегральные оценки потерь в переход-

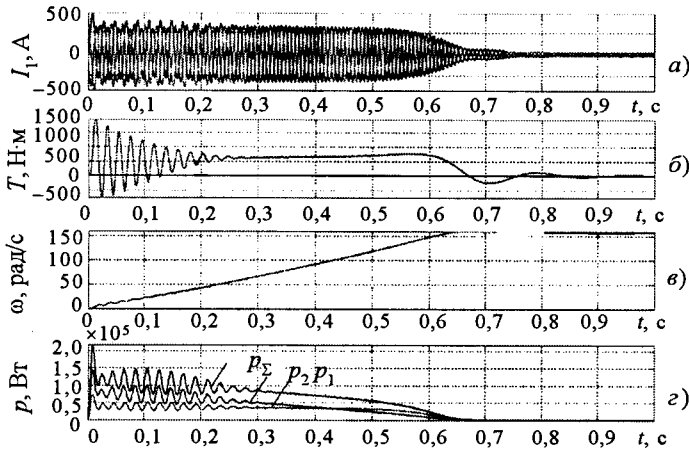


Рис.1. Временная диаграмма прямого пуска асинхронного двигателя 5A225M4:

а – токи статора; б – электромагнитный момент; в – частота вращения ротора; з – электрические потери в элементах машины

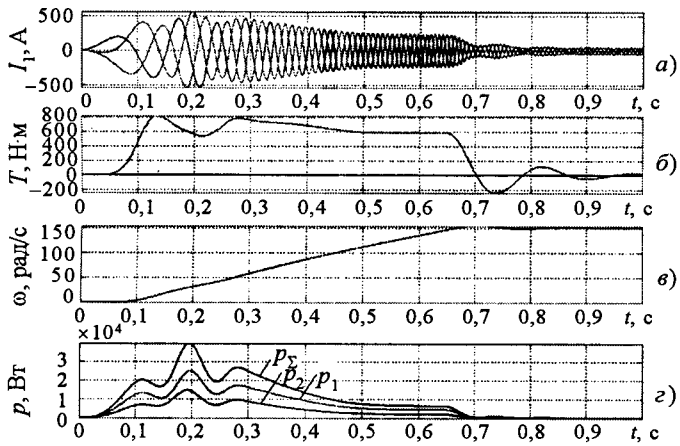


Рис.2 Временная диаграмма пуска двигателя 5A225M4 при скалярном управлении:

а – токи статора; б – электромагнитный момент; в – частота вращения ротора; з – электрические потери в элементах машины

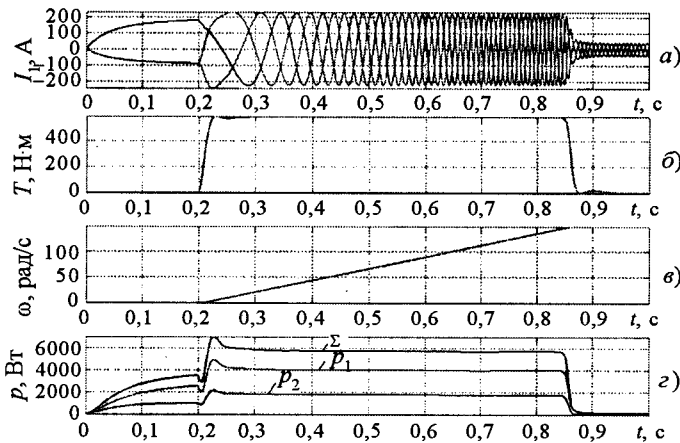


Рис.3. Временная диаграмма пуска двигателя 5A225M4 при векторном управлении:

а – токи статора; б – электромагнитный момент; в – частота вращения ротора; з – электрические потери в элементах машины

ных процессах при различных способах управления для трёх типов машин. В таблице приведены значения потерь  $E_{\Pi}$  в электрической цепи за время пуска  $t_{\Pi}$ :

$$E_{\Pi} = \int_0^{t_{\Pi}} p_{эл} dt,$$

где  $p_{эм}$  – мгновенное значение потерь в электрической цепи; и КПД пуска

$$\eta_{\Pi} = \frac{E_k}{E_k + E_{\Pi}},$$

где  $E_k$  – кинетическая энергия вращающегося ротора с моментом инерции  $J_n$  при установившейся скорости  $\Omega$ ,

$$E_k = \frac{J\Omega^2}{2}.$$

На рис.4 приведены временные диаграммы процессов пуска асинхронного двигателя 5A225M4 при скалярном и векторном управлении при вентиляторной нагрузке. При этом нагрузка задавалась в соответствии с выражением  $M = 0,0128\Omega + 0,01444\Omega^2$ . Наличие вентиляторной нагрузки не оказывает существенного влияния на энергетические характеристики при пуске. Например, для двигателя 5A225M4 электрические потери при прямом пуске составляют 57,8 кДж, при пуске в случае скалярного управления 11,8 кДж, при пуске в случае векторного управления 3,9 кДж.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Наиболее эффективным по энергетическому критерию в переходных режимах является векторное управление частотой вращения.
2. Энергетическая эффективность в переходных режимах при векторном управлении повышается с увеличением мощности двигателя.

Высокие энергетические показатели векторного управления асинхронным двигателем объясняются следующим образом. Электромагнитный момент асинхронного двигателя во вращающейся системе координат, ориентированной по потоку ротора, определяется выражением:

$$M = \frac{3}{2}(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d), \tag{1}$$

где  $\Psi_d, \Psi_q, i_d, i_q$  – компоненты потокосцепления и тока статора.

**Потери за время пуска в асинхронных двигателях при различных способах управления**

Способ управления	Двигатель 5А80МА4		Двигатель 5А225М4		Двигатель 5АМ315МВ2	
	$E_{п}, \text{кДж}$	КПД пуска при $E_{к} = 246 \text{ Дж}$	$E_{п}, \text{кДж}$	КПД пуска при $E_{к} = 31 \text{ кДж}$	$E_{п}, \text{Дж}$	КПД пуска при $E_{к} = 505 \text{кДж}$
Прямой пуск	0,65	0,27	50,27	0,38	737,56	0,41
Скалярное управление	0,50	0,32	9,35	0,77	79,85	0,86
Векторное управление	0,35	0,41	3,60	0,89	33,20	0,94

Векторное управление обеспечивает ориентацию системы координат таким образом, что продольная составляющая потокосцепления равна заданному значению потока  $\psi_d = \psi^*$ , а поперечная отсутствует  $\psi_q = 0$ . В этом случае выражение (1) принимает вид:

$$M = \frac{3}{2} \Psi^* i_q,$$

что соответствует максимальному значению момента при минимальном значении тока.

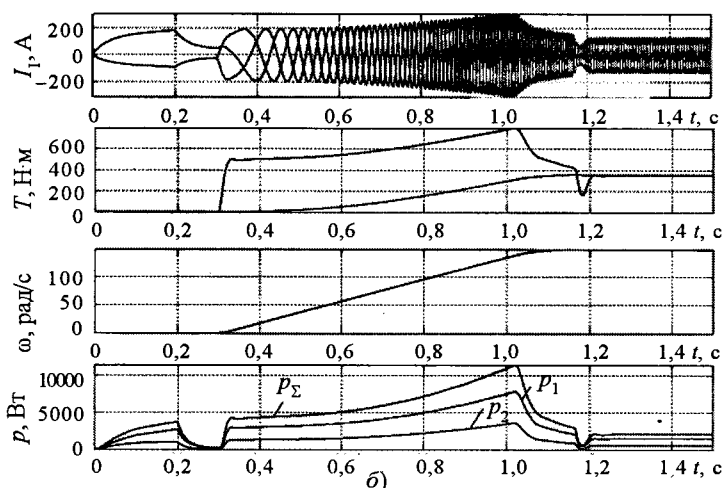
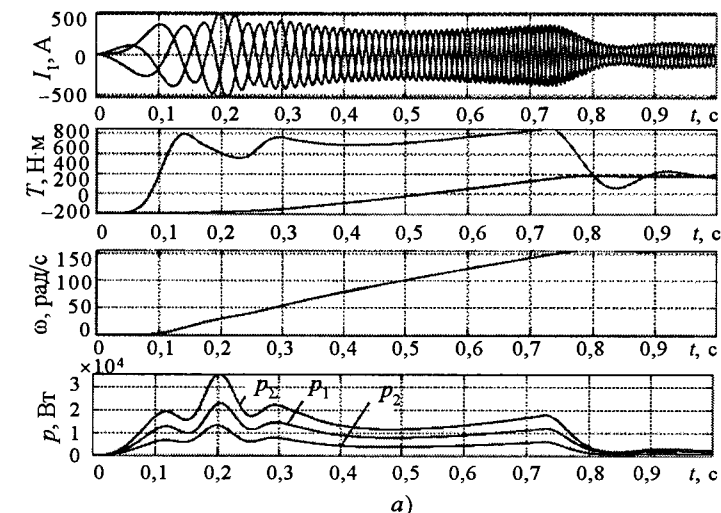
Особый практический интерес представляет вопрос о зависимости пусковых потерь от параметров регулятора частоты вращения, в качестве которого обычно используются пропорционально-интегральные устройства. Очевидно, что наибольшее влияние на пусковые потери оказывает время разгона, которое в основном определяется пропорциональной составляющей регулятора частоты вращения.

Исследования влияния пропорциональной составляющей регулятора частоты вращения на энергетические характеристики при переходных процессах проводились для электропривода с векторным управлением. В качестве базовых параметров пропорционально-интегрального регулятора с передаточной функцией, представленной в виде

$$H_p(s) = k_p + \frac{1}{T_p s},$$

были приняты настройки  $k_{p0}$  и  $T_{p0}$  на технический оптимум. На рис. 5 показаны временные диаграммы пуска электропривода с двигателем 5А225М4 при двух значениях пропорциональной составляющей регулятора частоты вращения. На рис. 6 приведены графики зависимостей потерь и времени пуска от коэффициента передачи пропорциональной составляющей регулятора, полученные для двигателя 5А225М4. Аналогичные результаты получены при моделировании других машин: 5А80МА4 и 5АМ315МВ2.

Для оценки достоверности результатов моделирования была проведена верификация результатов моделирования с экспериментальными



**Рис.4.** Временные диаграммы процессов при пуске асинхронного двигателя 5А225М4 с вентиляторной нагрузкой при скалярном (а) и векторном (б) способах управления

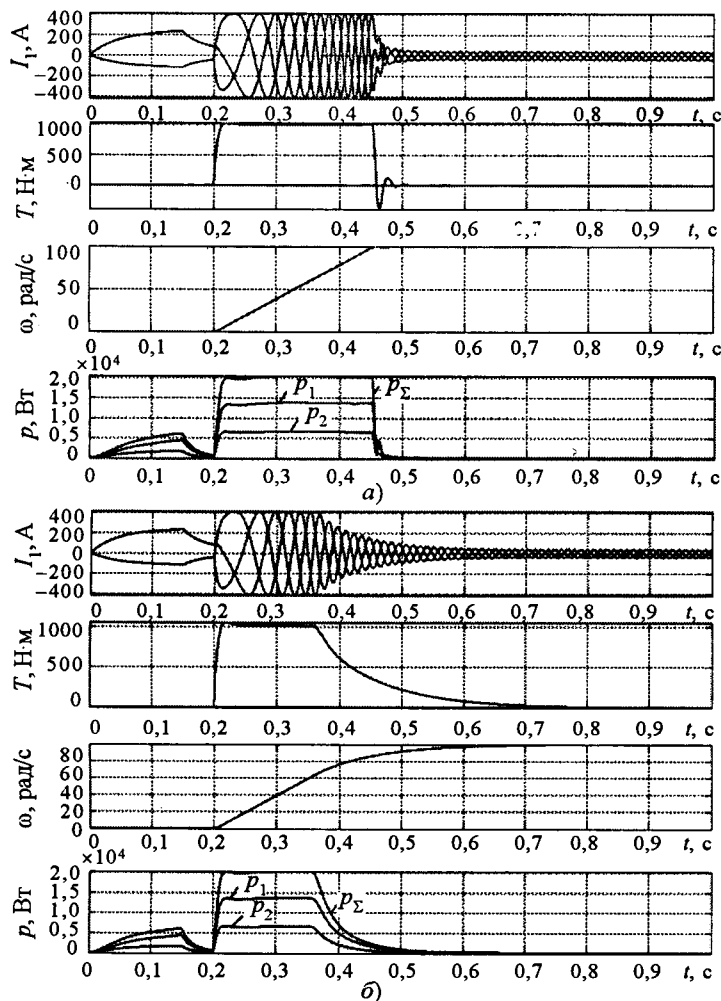


Рис.5. Временные диаграммы процессов частотно-го пуска асинхронного двигателя при настройке контура частоты вращения на технический оптимум (а) и коэффициенте передачи регулятора  $k_p = k_{p0}$  (б)

ми данными для двигателей высот 80–315 мм. Усреднённые погрешности для тока 10%, максимального момента 7%, пускового момента 13%.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В системе электропривода переменного тока с пропорционально-интегральным регулятором скорости энергетические характеристики имеют высокую чувствительность к вариациям коэффициента передачи регулятора скорости. При этом энергия, потребляемая из сети за время переходного процесса, практически прямо пропорциональна коэффициенту передачи регулятора скорости.

2. Зависимости потребляемой энергии и КПД от параметров настройки регуляторов имеют монотонный характер.

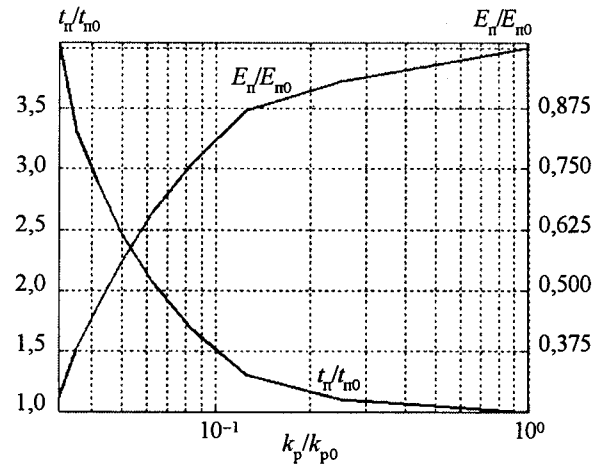


Рис.6. Зависимость потерь и времени пуска от коэффициента передачи регулятора частоты вращения ( $E_{п0}$ ,  $t_{п0}$  – потери и время пуска при настройке регулятора частоты вращения на технический оптимум)

3. Существенное уменьшение потерь при пуске может быть достигнуто уменьшением коэффициента передачи регулятора скорости за счёт снижения быстродействия.

Список литературы

1. Ключев В.И. Энергетика электропривода. М.: Изд-во МЭИ, 1994.
2. Малафеев С.И. Управление по критерию эффективного использования энергетических ресурсов // Тезисы докладов Третьей Международной конференции по проблемам управления (20–22 июня 2006 г.). Т. 2. М.: Институт проблем управления, 2006.
3. Захаров А.В., Кобелев А.С., Кудряшов С.В. Программные комплексы имитационного моделирования и расчёта двигателей для электропривода переменного тока // Труды международной четырнадцатой научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока". 13–16 марта 2007 г. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. С. 179–182.

**Малафеев Сергей Иванович** – главный научный сотрудник ООО "Компания "Объединенная Энергия", доктор техн. наук, проф. Окончил в 1975 г. приборостроительный факультет Владимирского политехнического института. Защитил диссертацию по теме "Управление по критерию эффективного использования энергетических ресурсов в мехатронных системах" в МГУ им. Н.Э. Баумана в 2002 г.

**Захаров Алексей Вадимович** – ведущий специалист ОАО НИПТИЭМ, канд. техн. наук. Окончил в 2001 г. факультет информатики и прикладной математики Владимирского государственного университета. Защитил диссертацию по теме "Исследование и разработка мехатронной системы с двухфазным нереверсивным индукторным двигателем" во Владимирском государственном университете в 2004 г.

# Электрическая мощность серийного асинхронного двигателя при его использовании в качестве асинхронного генератора

КОСТЫРЕВ М.Л., ДЖЕНДУБАЕВ А-З.Р.

*Рассмотрен генераторный режим работы серийного двигателя. Показано, что при номинальном напряжении сети выходная мощность в генераторном режиме меньше номинальной выходной мощности двигателя. При меньшем значении напряжения сети мощность генераторного режима асинхронного двигателя возрастает.*

*The generator mode of the serial induction motor is considered. It is shown, that at main rated voltage the output power in the generator mode is less to the motor output power rating. At smaller value of main voltage the output power in the generator mode increases.*

В последние годы возрос интерес к возобновляемым источникам энергии на базе мини- и микро-ГЭС. В некоторых из них в качестве электромеханических преобразователей энергии используют серийные асинхронные двигатели [1, 2]. Эти ГЭС работают параллельно с сетью или автономно. В последнем случае применяется система стабилизации напряжения и частоты, основанная на использовании балластной нагрузки.

При проектировании асинхронного двигателя за номинальное фазное напряжение принимают значение, стандартное для потребителей электроэнергии, например 220 В. При коротких питающих линиях стандарт допускает номинальное напряжение источников, равное напряжению приёмников, т.е. 220 В, в противном случае, напряжение источника должно быть 230 В [3].

Таким образом, работа серийного двигателя в составе мини- или микро-ГЭС отличается изменением не только режима его работы, но и напряжения. В связи с этим возникает ряд вопросов, в частности, о влиянии напряжения сети на мощность генераторного режима серийного асинхронного двигателя.

Результаты исследования работы серийного двигателя в генераторном режиме при напряжении источника 220 В представлены в [4]. Что касается мощности генераторного режима при напряжении 230 В или пониженном, например 209 В, то публикаций по этой теме практически нет.

Поэтому целью данной статьи, является в-первых, определение мощности, которую мо-

жет генерировать в сеть серийный асинхронный двигатель при номинальной частоте сети и тока статора, а также номинальном напряжении (для источников), т.е. 230 В, во-вторых, исследование влияния напряжения статора на мощность и КПД генераторного режима.

Для решения поставленной цели воспользуемся схемой замещения асинхронной машины, представленной на рис. 1.

Этой схеме замещения соответствует следующее комплексное уравнение:

$$-\frac{\dot{U}_1}{Z_1} + \left( \frac{1}{Z_{\mu\alpha}} + \frac{1}{Z_{\mu r}} + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) j\omega \dot{\Psi}_\delta = 0, \quad (1)$$

где  $Z_1 = r_1 + j\omega L_{\sigma 1}$  – полные сопротивления обмоток статора;  $Z_{\mu\alpha} = r_{\mu\alpha} + j0$ ,  $Z_{\mu r} = 0 + j\omega M = 0 + j\omega(\Psi_\delta/I_{\mu r})$  – соответственно активное (фиктивное) и главное индуктивное сопротивления, представленные в комплексном виде;  $\Psi_\delta = MI_{\mu r}$  – главное потокосцепление машины;  $Z_2 = r_2/s + j\omega L_{\sigma 2}$  – полные сопротивления обмоток ротора.

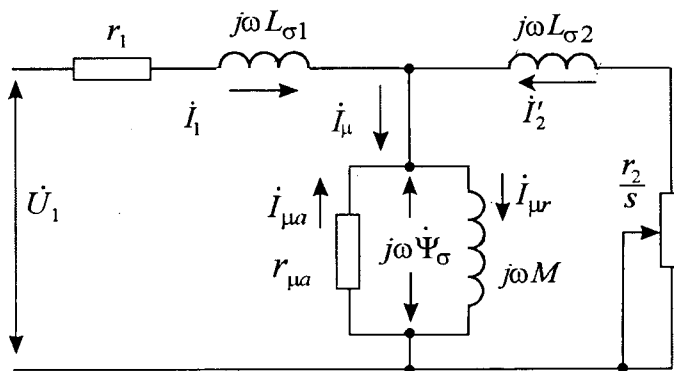


Рис.1

Уравнение (1) необходимо дополнить выражениями, которые аппроксимируют зависимости  $r_{\mu a} = f(\Psi_{\delta})$  и  $I_{\mu r} = f(\Psi_{\delta})$ , что позволит по известному потокоцеплению определить соответственно эквивалентное сопротивление  $r_{\mu a}$ , взаимную индуктивность обмоток  $M = \Psi_{\delta}/I_{\mu r}$  и сопротивление  $Z_{\mu r}$ . При расчёте примем, что векторы потокоцепления  $\dot{\Psi}_{\delta}$  и тока  $\dot{I}_{\mu r}$  направлены по оси Re. Вектор напряжения  $\dot{U}_1$  изменяет свое положение в зависимости от параметров машины и скорости ротора.

Для решения нелинейного комплексного уравнения (1) воспользуемся средой программирования MATLAB7 [5]. В качестве неизвестных примем главное потокоцепление и угол между Re осью и вектором напряжения, т.е.

$\dot{\Psi}_{\delta} = x_1 + j0$ , а  $\varphi = x_2$ . Естественно, что для получения системы двух нелинейных уравнений необходимо использовать функции определения Re и Im частей уравнения.

Следует отметить, что решение уравнения (1) хорошо сходится, если воспользоваться начальными значениями переменных, которые получены на основе приближённого расчёта или экспериментальных исследований, например режима ХХ.

В качестве объекта для исследований воспользуемся асинхронной машиной серии 4АМ100L6. Параметры машины, которые определены из опыта КЗ и опыта с вынутым ротором [6], в относительных единицах имеют следующие значения:  $r_1 = 0,073$ ;  $r_2 = 0,05$ ;  $L_{\sigma 1} = 0,078$ ;  $L_{\sigma 2} = 0,144$ . В качестве базисных величин приняты номинальные значения, т.е.  $I_6 = 5,6$  А,  $U_6 = 220$  В,  $P_6 = 3U_6I_6 = 3,696$  кВт. Базисная частота:  $\omega_6 = 314,159$  рад/с. Номинальная мощность и КПД двигателя:  $P_{ном} = 2,2$  кВт,  $\eta_{ном} = 0,81$ . Экспериментальные результаты, представленные на рис.2 при  $\omega = 1$  о.е., были получены в ходе проведения опыта ХХ, причём ротор приводился во вращение с помощью синхронного двигателя. Зависимости  $r_{\mu a} = f(\Psi_{\delta})$  и  $I_{\mu r} = f(\Psi_{\delta})$  аппроксимированы следующими функциями:

$$\left. \begin{aligned} r_{\mu a} &= -309,55\Psi_{\delta}^2 + 501,88\Psi_{\delta} - 157,72; \\ I_{\mu r} &= 46,526\Psi_{\delta}^4 - 147,2\Psi_{\delta}^3 + 175,26\Psi_{\delta}^2 - \\ &- 92,044\Psi_{\delta} + 18,286. \end{aligned} \right\} (2)$$

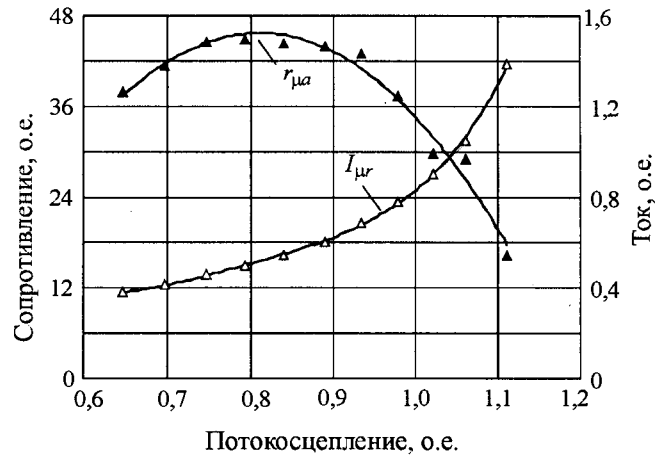


Рис.2

Следует отметить, что выражения (2) достаточно легко получить с помощью программы построения графиков, которая входит в MS Word (Добавить диаграмму → Диаграмма → Добавить линию тренда → Полиномиальная).

После решения уравнения (1) вычисление токов и суммарных потерь (без учёта механических и добавочных потерь) не встречает особых трудностей:

$$\Delta P = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + I_{\mu a}^2 r_{\mu a}. \quad (3)$$

Механическая мощность на валу двигателя

$$P_{мех} = I_2^2 r_2 (1 - s) / s. \quad (4)$$

Электрическая мощность, потребляемая в двигательном режиме, вычисляется как сумма механической мощности и потерь, т.е.  $P_{эл} = P_{мех} + \Delta P$ . В генераторном режиме мощности  $P_{эл}$  и  $P_{мех}$  принимают отрицательные значения (меняется направление преобразования энергии), поэтому электрическая мощность, отдаваемая в сеть,  $-P_{эл} = -P_{мех} + \Delta P$ .

Результаты расчёта двигательного и генераторного режимов при номинальном токе статора и частоте сети представлены в табл. 1. Параметры машин определялись экспериментально. При расчёте мощностей и КПД машины с фазным ротором серии МТ-11-6 учитывались механические потери, которые составили 124,4 Вт.

Представленные в табл. 1 результаты свидетельствуют о том, что снижение напряжения благоприятно сказывается на мощности и КПД генераторного режима. Это объясняется тем, что при номинальном токе статора перевод се-

Таблица 1

№	Паспортные данные			Расчёт											
	Тип	$P_{ном},$ кВт	КПД	Двигательный режим					Генераторный режим						
				$U_{Ад}=220$ В											
				$P_{эл},$ кВт	$P_{мех},$ кВт	КПД	$E_{Ад},$ В	$I_{ном},$ А $I_{μ},$ А	$U_{АГ},$ В	$P_{эл},$ кВт	$P_{мех},$ кВт	КПД	$E_{АГ},$ В	$I_{μ},$ А	$\frac{P_{эл}}{P_{ном}}$
1	АИР80А4	1,1	0,75	1,483	1,168	0,788	194,1	2,743	230	0,356	0,65	0,548	224,4	2,59	0,324
									220	0,66	0,961	0,686	219,3	2,36	0,6
								1,457	209	0,873	1,184	0,737	212,54	2,07	0,794
2	4АМ100L6	2,2	0,81	2,644	2,215	0,838	196,5	5,6	230	1,481	1,907	0,776	221,3	4,74	0,673
									220	1,828	2,259	0,808	214,2	4,24	0,831
								3,445	209	2,015	2,451	0,822	205,4	3,78	0,916
3	МТ-11-6	2,2	0,64	3,256	2,241	0,688	189,3	7,2	230	1,695	2,627	0,645	224,3	6,18	0,77
									220	1,911	2,87	0,666	216,5	5,856	0,869
								5,01	209	2,05	3,039	0,675	207,4	5,528	0,932
4	РА80В2	1,1	0,77	1,419	1,17	0,825	202,1	2,517	230	1,133	1,386	0,817	233,8	1,69	1,051
									220	1,178	1,435	0,821	225,2	1,527	1,071
								1,188	209	1,194	1,454	0,821	215,4	1,367	1,086
5	РА90L2	2,2	0,82	2,685	2,279	0,8496	201,7	4,673	230	2,057	2,5	0,823	230,1	3,117	0,935
									220	2,229	2,657	0,839	222,3	2,649	1,013
								1,869	209	2,299	2,722	0,845	213,1	2,23	1,045

Таблица 2

№	Паспортные данные				Расчёт							
	Тип	$P_{ном},$ кВт	КПД	$\Delta P,$ кВт	Двигательный режим	Генераторный режим						
					$U_{Ад} = 220$ В							
					$\lambda = \frac{P_{мех. макс}}{P_{ном}}$	$U_{АГ},$ В	$P_{эл макс},$ кВт	$P_{эл} = \frac{P_{эл макс}}{\lambda},$ кВт	$\frac{I_{1 макс}}{I_{1 ном}}$	КПД	$\Delta P,$ кВт	$\frac{P_{эл}}{P_{ном}}$
1	АИР80А4	1,1	0,75	0,367	2,037	230	4,885	2,398	2,365	0,602	1,586	2,18
						220	3,592	1,763	1,719	0,674	0,853	1,603
2	4АМ100L6	2,2	0,81	0,516	2,078	230	6,824	3,284	3,491	0,78	0,924	1,493
						220	6,417	3,088	3,297	0,795	0,794	1,404
3	МТ-11-6	2,2	0,64	1,238	1,699	230	8,346	4,912	1,706	0,616	3,06	2,23
						220	7,781	4,58	1,627	0,622	2,78	2,08
4	РА80В2	1,1	0,77	0,329	2,269	230	6,253	2,875	2,068	0,743	0,994	2,613
						220	6,092	2,685	1,975	0,745	0,919	2,441
5	РА90L2	2,2	0,82	0,483	2,129	230	9,081	4,266	1,765	0,774	1,246	1,939
						220	8,583	4,031	1,657	0,789	1,078	1,832

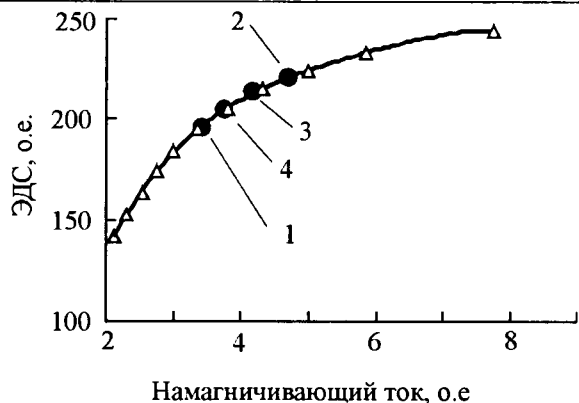


Рис.3:

1 —  $E_{АД} = E_{АГ}$  при  $U_{АД} = 220$  В,  $U_{АГ} = 198,6^*$  В;  
 2 —  $E_{АГ}$  при  $U_{АГ} = 220$  В; 3 —  $E_{АГ}$  при  $U_{АГ} = 220$  В;  
 4 —  $E_{АГ}$  при  $U_{АГ} = 209$  В

рийного двигателя, например серии 4АМ100L4, с номинальным для потребителей напряжением 220 В (точка 1 на рис.3) в режим генератора с напряжением 230 В, которое характерно для источников электроэнергии (точка 2 на рис.3) сопровождается ростом ЭДС и намагничивающего тока. Это в свою очередь приводит к уменьшению мощности машины в генераторном режиме по сравнению с номинальной (паспортной) мощностью двигателя  $P_{эл}/P_{ном} = 0,673$ . Снижение напряжения благоприятно сказывается на мощности генераторного режима. Так, при напряжении 220 В (точка 3 на рис.3) отношение мощностей возрастает до  $P_{эл}/P_{ном} = 0,831$ . Если потребители допускают работу при пониженном на 5% напряжении, т.е. при 209 В (точка 4 на рис.3), то отношение мощностей еще более возрастает:  $P_{эл}/P_{ном} = 0,916$ . Следует отметить, что снижение напряжения может оказать негативное влияние на устойчивость работы в установившемся режиме при работе машины в качестве автономного генератора. При равенстве ЭДС генераторного и двигательного режимов (кривая 1) отношение мощностей достигает наибольшего значения  $P_{эл}/P_{ном} = 0,946$ . Однако напряжение, при котором возможна такая работа машины, составляет  $U = 198,6^*$  В, что неприемлемо с точки зрения потребителей.

При снижении напряжения значение КПД генераторного режима, полученное в ходе расчета, возрастает, однако не достигает значения (расчетного) двигательного режима.

Известно, что относительное значение намагничивающего тока снижается по мере уменьшения количества пар полюсов асинхронной машины. Это оказывает благоприятное влияние на мощность генераторного режима, поскольку уменьшается негативное влияние роста намагничивающего тока при переходе в генераторный режим. Согласно расчетам, мощность генераторного режима двухполюсного двигателя чуть больше его номинальной мощности (позиции 4 и 5 в табл.1). Однако это достоинство не является определяющим при выборе электромеханического преобразователя для мини- или микро-ГЭС. Последнее связано с тем, что для согласования частоты вращения двухполюсной асинхронной машины (3000 об/мин) и гидротурбины, частота вращения которой обычно не превышает 1500 об/мин [1], требуется редуктор, использование которого не всегда оправдано.

Следует подчеркнуть, что одним из способов увеличения мощности генераторного режима является модернизация охлаждения серийной машины, например за счет использования воды, поступающей на мини-ГЭС. В этом случае можно полностью реализовать запас перегрузочной способности машины (по мощности) при работе в генераторном режиме. Результаты расчета при равенстве перегрузочной способности двигательного и генераторного режимов, т.е.  $\lambda = \lambda_{АД} = P_{мех\ max}/P_{ном} = \lambda_{АГ} = P_{эл\ max}/P_{ном}$ , представлены в табл.2. При таком подходе существенно возрастает мощность генераторного режима. Увеличение напряжения также благоприятно сказывается на мощности генераторного режима, однако возрастают и потери и, как следствие, уменьшается КПД. В целом, проблема снижения КПД серийного двигателя при его работе в качестве генератора мини-ГЭС является второстепенной, поскольку машина приводится во вращение за счет возобновляемого ("бесплатного") источника энергии.

Авторы выражают признательность руководству ООО "Научно-технический центр" (г. Ставрополь) в лице председателя совета директоров Ермолова В.Г. и директора Вендина А.В. за оказанную помощь при подготовке данной работы.

## Выводы

1. При работе серийного двигателя с  $2p \geq 4$  в генераторном режиме с номинальной для ис-

точников электроэнергии напряжением, например 230 В, номинальной частотой и током, мощность генераторного режима всегда меньше номинальной мощности двигателя.

2. При коротких питающих линиях снижение напряжения сети, например до допустимого уровня 209 В, приводит к увеличению мощности генераторного режима серийного двигателя.

#### Список литературы

1. Торопцев Н.Д. Электрические машины сельскохозяйственного назначения. М.: Энергоиздат, 2005.
2. Костырев М.Л., Штанов А.Н., Мотовилов Н.В. и др. Асинхронные генераторы в составе микрогидроэлектростаций // Электротехника. 1991. №4.
3. Справочник по электрическим машинам / Под общ. ред. И.П.Копылова и Б.К.Клокова. Т.1. М.: Энергоатомиздат, 1988.

4. Джэндубаев А-З.Р. Особенности работы серийного асинхронного двигателя в генераторном режиме параллельно с сетью // Изв. вузов. Электромеханика. 2003. №1. С.12–16

5. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7: программирование, численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.

6. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984.

Костырев Михаил Леонидович – заведующий кафедрой "Электротехническое инженерно-педагогическое образование" Самарского ГТУ, доктор техн. наук, проф.

Джэндубаев Абрек-Заур Рауфович – доцент кафедры электроснабжения Карачаево-Черкесской государственной технологической академии, канд. техн. наук.

## Разработка и внедрение системы управления напряжением синхронных генераторов

АНДРИАНОВ М.В., КРУГЛИКОВ О.В., РОДИОНОВ Р.В.

*Приводятся результаты моделирования и испытаний электроприводов синхронных генераторов напряжения 50 и 100 Гц мощностью 400 кВт. Область применения генераторов – испытания низковольтных асинхронных электродвигателей при регулировании амплитуды и частоты питающего напряжения. Автоматизировано задающее воздействие по питающему напряжению на испытуемый двигатель.*

*The results of modelling and tests of electric drives of synchronous generators of a voltage 50 and 100 Hz by capacity of 400 kw are resulted. The field of application of generators – tests of low-voltage asynchronous electric motors at regulation of amplitude and frequency of voltage. Specifying influence on voltage on the tested motors is automated.*

В настоящее время большое внимание уделяется автоматизации производственных процессов, повышению производительности, эффективному использованию промышленных площадей. Одним из наиболее эффективных средств повышения производительности является автоматизированный электропривод. Обладая такими свойствами, как энергосбережение, ресурсосбережение и имея возможности управления по стандартному интерфейсу с применением современных средств управления, внедрение регулируемого электропривода даёт

возможность модернизации устаревшего оборудования. Предлагаемая разработка относится к области испытательной техники электрических машин. При испытаниях асинхронных двигателей, предназначенных для эксплуатации с преобразователями частоты, необходимо проведение комплексных испытаний по определению энергетических показателей. Для проведения таких испытаний необходимо наличие источника синусоидального напряжения с регулируемой амплитудой и частотой. Такими источниками являются синхронные генераторы, уп-

равление частотой напряжения которых осуществляется с помощью машин постоянного тока. Данный способ управления имеет следующие недостатки:

1. Большие потери в дополнительных возбудительных агрегатах.

2. Девиации частоты вращения машины постоянного тока, вращающей синхронный генератор, из-за нагревов обмоток возбуждения и изменения тока возбуждения.

3. Сложность автоматизации управления напряжением генераторов.

В соответствии с требованиями современных стандартов по определению потерь и КПД [1–3] разработана система управления напряжением синхронных генераторов при проведении исследований низковольтных асинхронных электродвигателей. Предлагаемая структура системы управления напряжением синхронных генераторов позволяет улучшить энергетические и регулировочные характеристики испытательного оборудования.

На рис. 1 показана функциональная схема оборудования для двух синхронных генераторов напряжения частотой 50 и 100 Гц, состоя-

щая из двух секционных преобразователей частоты, системы возбуждения синхронных генераторов ВСГ-1-160\105, приводных двигателей АДЧР-450-400-6У3. Преобразователь частоты работает на приводные двигатели поочередно. ПЧ выполнен из двух секций по 200 кВт, подключение каждой секции к двигателю выполнено отдельным кабелем. В качестве датчика частоты вращения применён датчик "Leine & Linde" типа 862-10.7356/2048.

Управление амплитудой и частотой напряжения синхронных генераторов осуществляется независимо: амплитудой управляет система ВСГ-1-160\105, частотой – преобразователь КЕВ 33.F5M1P-90DA через регулирование частоты вращения двигателей. Управление от ЭВМ преобразователем КЕВ осуществляется по интерфейсу Ethernet. Выбор интерфейса обусловлен расстоянием управляющей ЭВМ от ПЧ.

Управление системой возбуждения осуществляется через пульт оператора, информационный обмен между пультом оператора и управляющей ЭВМ происходит по интерфейсу RS-232. В табл. 1 приведены основные техни-

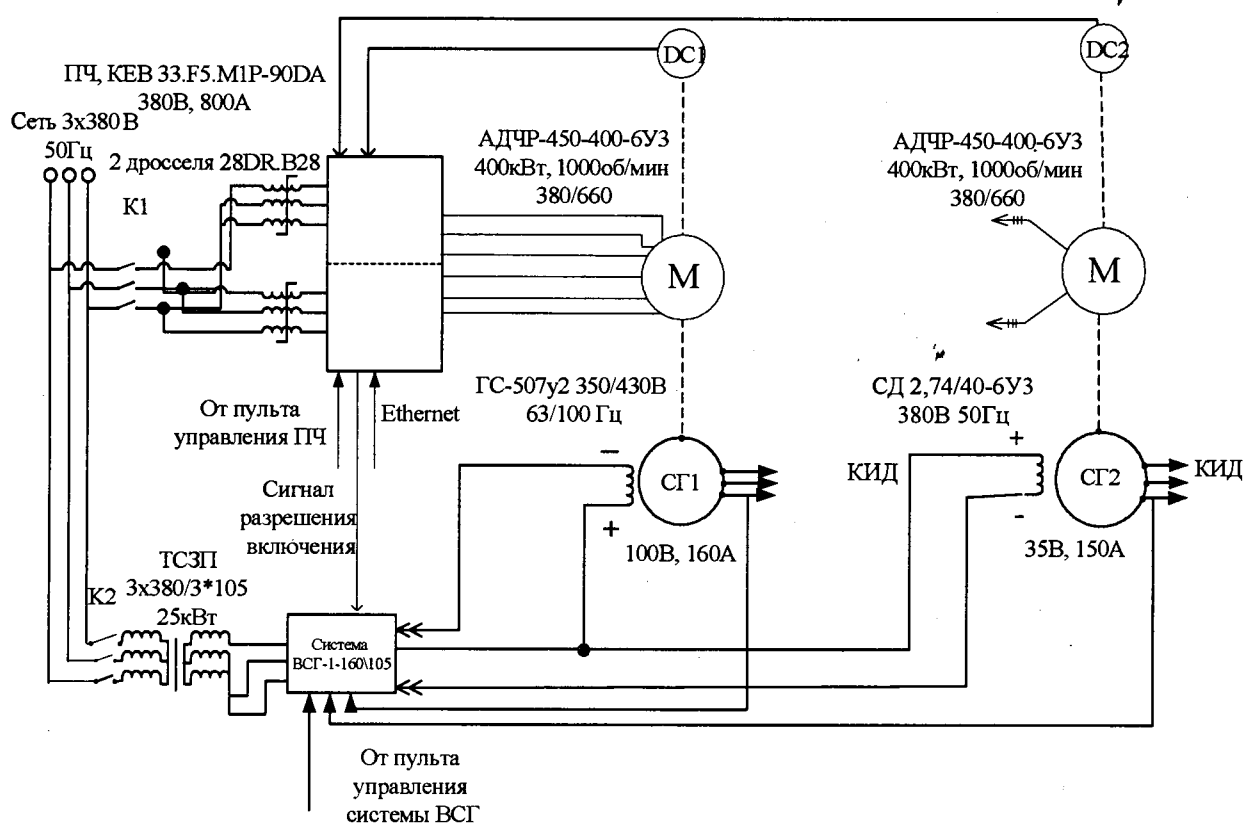


Рис. 1. Функциональная схема

Таблица 1

Характеристика	СД 2,74/40-6У3			ГС-507		
	400	1000	1200	400	1000	1200
Частота вращения, об/мин	400	1000	1200	400	1000	1200
Амплитуда напряжения, В	190	380	380	215	430	430
Мощность, кВт	200	400	400	200	400	400
Частота напряжения, Гц	25	50	60	50	100	120

ческие характеристики генераторов СД 2,74/40-6У3 и ГС-507.

Основными требованиями к системе управления при разработке были:

1. Точность регулирования частоты напряжения – 0,1%.

2. Точность регулирования амплитуды напряжения генераторов – 1%.

3. Запас мощности в зависимости от максимальной мощности испытуемого двигателя в продолжительном режиме (200 кВт) – 200%.

4. Время переходных процессов не должно превышать 6 с.

5. Диапазон регулирования частоты вращения вниз – 1:2, вверх – 20%.

6. Диапазон регулирования амплитуды  $0-U_{ном}$ .

На основе разработанной структурной схемы было осуществлено моделирование системы управления. Принимая во внимание, что амплитуда и частота напряжения регулируются по независимым каналам управления, моделирование проведено отдельно для асинхронного двигателя и генераторов.

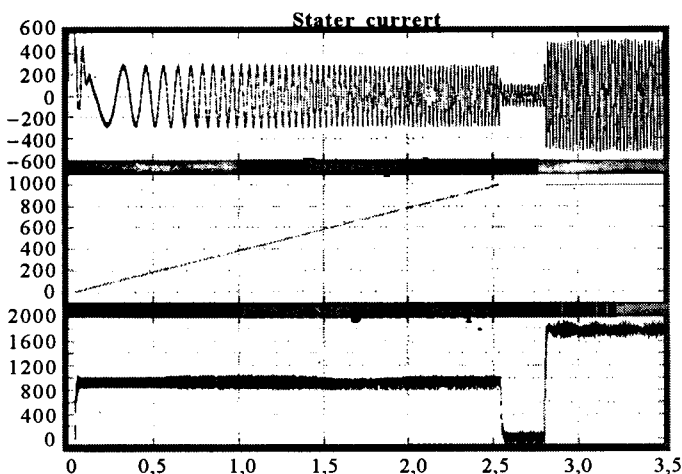


Рис.2. Результаты моделирования работы электропривода

**Основные технические параметры электродвигателя АДЧР450-400-6У3**

Мощность, кВт	400
Напряжение, В	380/660
Частота, Гц	50
Синхронная частота вращения, об/мин	1000
Ток, А	740/427
Коэффициент мощности	0,87
КПД, %	94,4
Момент инерции ротора, м <sup>2</sup>	22

**Расчётные параметры Т-образной схемы замещения, приведённые к рабочему режиму**

Активное сопротивление статора, Ом	0,00988
Индуктивное сопротивление статора, Ом	0,008
Активное сопротивление ротора, Ом	0,01195
Индуктивное сопротивление ротора, Ом	0,115
Индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом	3,092

Система возбуждения ВСГ-1-160/105 выполнена двухконтурной: первый контур регулирования – контур регулирования тока возбуждения синхронных генераторов, второй – контур регулирования амплитуды выходного напряжения генераторов. При проведении опыта КЗ и снятия механической характеристики быстроходных АД используется одноконтурная схема управления, а при проведении испытания на нагревание, опыта нагрузки, опыта КЗ для тихоходных АД используется двухконтурная схема управления. Это позволило не только автоматизировать управление напряжением питания испытуемых двигателей, но и существенно уменьшить ударный момент при включении тихоходных АД в опыте КЗ и снятии механической характеристики.

При моделировании активное сопротивление обмотки статора было приведено к температуре 75°С, активное сопротивление ротора – к температуре ротора в рабочем режиме, которая больше температуры обмотки статора приблизительно на 40°С. Моделирование проведено в среде Matlab с использованием элементов Simpowersystem. Полученные результаты моделирования работы электропривода с преобразователем КЕВ и двигателем АДЧР450-400-6У3 показаны на рис.2 при набросе нагрузки 200 кВт.

Результаты моделирования контура управления амплитудой напряжения синхронных генераторов СД 2,74/40-6У3 и ГС-507 приведены на рис.3,4 при включении активно-индуктивной нагрузки 200 кВт.

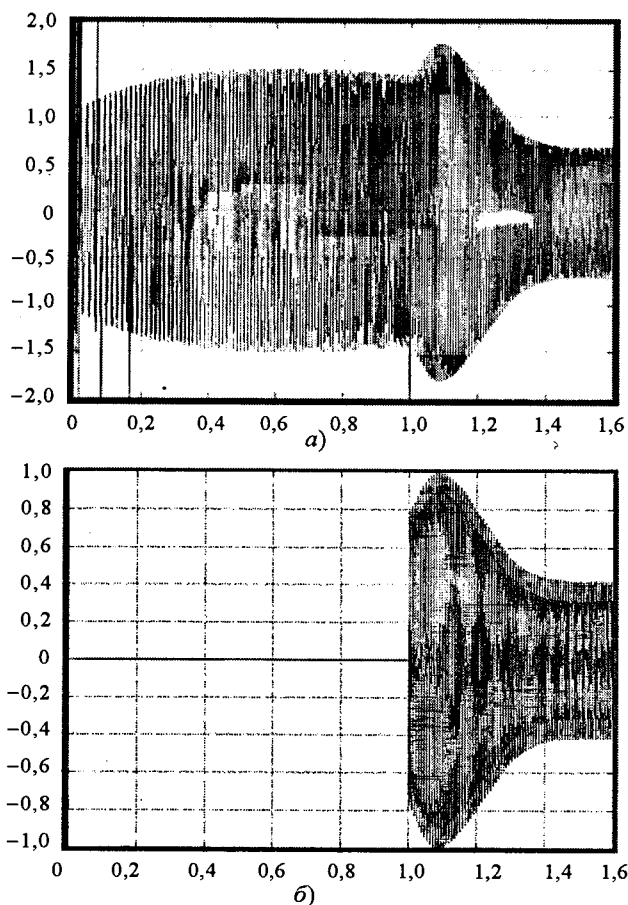


Рис.3. Напряжение (а) и ток (б) генератора СД2,74 при включении нагрузки 200 кВт

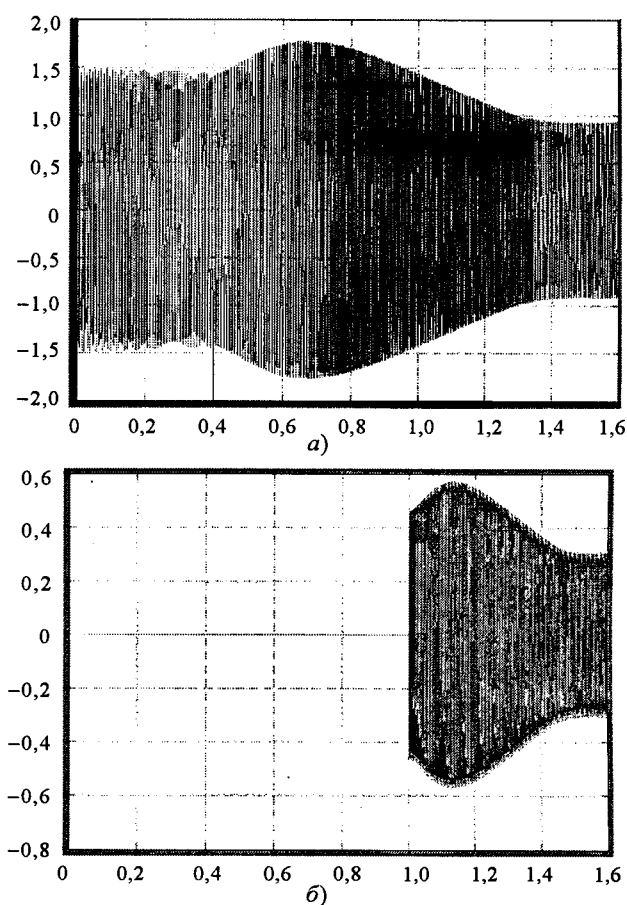


Рис.4. Напряжение (а) и ток (б) генератора ГС-507 при включении нагрузки 200 кВт

Разработанная система управления (рис. 1) успешно испытана в лаборатории электрических испытаний ОАО "НИПТИЭМ". Результаты испытаний приведены в табл.2.

Испытания показали соответствие требованиям, предъявляемым к системе управления напряжением синхронных генераторов и применяемым при исследовании низковольтных асинхронных электродвигателей.

**Выводы**

1. В разработанной системе управления синхронных генераторов повышена эффективность использования испытательного оборудования за счёт уменьшения занимаемых площадей.

2. Повышена точность регулирования амплитуды и частоты переменного напряжения, питающего тестируемые образцы асинхронных двигателей.

Таблица 2

Характеристика	Генератор	
	СД 2,74/40-6У3	ГС-507
Точность задания частоты напряжения, %, при <i>n</i>	1000 об/мин	0,08
	400 об/мин	0,09
	1200 об/мин	0,06
Точность задания амплитуды напряжения, %, при <i>n</i> = 1000 об/мин	$U = U_{ном}$	0,97
	$U = 0,5U_{ном}$	1,70
Время переходного процесса при включении, с	$U = 0,25U_{ном}$	1,5*
	$U = 0,5U_{ном}$	1,8*
	$U = U_{ном}$	2,7*
Выброс переходного процесса при включении, %	$U = 0,25U_{ном}$	15*
	$U = 0,5U_{ном}$	17*
	$U = U_{ном}$	19*
* При <i>P</i> = 200 кВт		
** При <i>P</i> = 45 кВт		

3. Автоматизирован процесс испытаний – автоматизировано задающее воздействие на испытуемый двигатель со стороны питающего напряжения и поддержание заданного значения амплитуды и частоты в течении проведения испытаний на нагревание и опыта нагрузки.

4. Разработанная система управления применяется для регулирования оборудования испытательного центра ОАО "НИПТИЭМ".

#### Список литературы

1. ГОСТ-11828. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний.

2. ГОСТ-25941. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия.

3. IEC 60034-2-1. Rotating electrical machines. Part2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).

4. Андрианов М.В., Родионов Р.В. Экспериментальные исследования энергетических показателей частотно-регулируемых асинхронных двигателей, работающих от полигармонических источников напряжения // Электротехника. 2006. №11. С.6–10.

5. Пат. РФ № 37835. Устройство для испытания асинхронных двигателей / М.В. Андрианов, Р.В. Родионов // Б.И. 2004. №13.

6. Пат. РФ № 41877. Автоматизированный стенд для испытаний частотно-регулируемых асинхронных двигателей / М.В. Андрианов, Р.В. Родионов // Б.И. 2004. №31.

7. Андрианов М.В., Родионов Р.В. Особенности электрических измерений при испытаниях асинхронных двигателей, работающих с преобразователями частоты // Электротехника. 2004 №3. С.47–50.

8. Пат. РФ № 41211. Преобразователь активной мощности трёхфазной цепи несинусоидального напряжения в цифровой код / М.В. Андрианов, Р.В. Родионов // Б.И. 2004. №28.

**Андрианов Михаил Васильевич** – руководитель лаборатории микропроцессорного электропривода Владимирского государственного университета, канд. техн. наук. В 1985 г. окончил факультет технической кибернетики Владимирского политехнического института. В 1994 г. защитил диссертацию по теме "Исследование и разработка методов и технических средств повышения энергетических характеристик вентильных электроприводов".

**Кругликов Олег Валерьевич** – исполнительный директор ОАО "Научно-исследовательский проектно-технологический институт электромашиностроения". В 1991 г. окончил факультет "Материалы и технологические процессы" МГТУ им. Баумана.

**Родионов Роман Вячеславович** – инженер ОАО "Научно-исследовательский проектно-технологический институт электромашиностроения", канд. техн. наук. В 1999 г. окончил ВлГУ. В 2005 г. защитил диссертацию по теме "Исследование и совершенствование методов и средств испытания по определению энергетических показателей систем приводов с частотно-регулируемыми асинхронными двигателями".

## Волновые параметры и межвитковые перенапряжения в многовитковой насыпной обмотке асинхронного двигателя, питаемого от ШИМ-преобразователя

БЕЛАССЕЛ МОХАНД-ТАХАР, БЕСПАЛОВ В.Я.

*Изложена методика расчёта волновых параметров и межвитковых перенапряжений в многовитковой насыпной обмотке асинхронного двигателя, питаемого от преобразователя частоты. Представлена математическая модель и результаты моделирования волновых процессов в секциях (витках) многовитковой насыпной обмотки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.*

Надёжность работы электрических машин в значительной степени зависит от конструкций и технологий изготовления их обмоток. В подавляющем большинстве случаев отказы дви-

*Calculation methods for high-frequency parameters and voltage surges between the whorls of flexible winding to several whorls of induction motors fed from frequency converters with pulse width modulation (PWM) are considered. Mathematical model and surges simulation results are represented the mathematical model and the results of modeling of the wave process on the sections (winding) of a winding to several for an asynchronous motor with a cage rotor.*

гателей происходят из-за повреждения обмоток. Основные отказы обмоток приходятся на межвитковые изоляции. Этот факт показывает, что основное внимание в асинхронных двигате-

лях с всыпной обмоткой должно быть обращено на межвитковую изоляцию.

Условия работы этих машин ухудшились при применении регулируемых электроприводов переменного тока, которые строятся на базе асинхронных двигателей (АД) и преобразователей частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока, осуществляющих формирование выходных напряжений посредством ШИМ, т.е. серией импульсов прямоугольной формы.

В большинстве современных ПЧ используются биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT с частотой переключения 2–8 кГц. Длительность фронта импульсов определяется типом ключевых элементов преобразователя, она может составлять 0,2–1 мкс.

Применение ПЧ-ШИМ в асинхронных электроприводах сопровождается возникновением в обмотке АД значительных перенапряжений, обусловленных несинусоидальностью и импульсами напряжения на выходе ПЧ.

Эти перенапряжения наиболее опасны для межвитковой изоляции всыпных обмоток АД. Кроме того, при быстром нарастании напряжённости электрического поля на фронте волны в изоляции машин возникают заметные диэлектрические потери.

Целью данной работы является расчёт волновых параметров и составление математических моделей для отыскания межвитковых перенапряжений всыпной обмотки АД. Для этого были использованы размеры, обмоточные данные и свойства материалов АД, который выпускается фирмой "ELECTRO-INDUSTRIES"; Azazga, Algerie (АЛЖИП), со следующими основными данными:

Номинальная мощность $P_2$ , кВт .....	3
Номинальное напряжение $U$ , В .....	380/660
Число полюсов $2p$ .....	4
Число фаз $m$ .....	3
Число пазов статора $z$ .....	36
Обмотка статора двигателя .....	однослойная концентрическая

Расчёт волновых параметров является первым этапом решения задачи. Он базируется на известной схеме замещения (рис. 1,а), а методика расчёта этих параметров для исследуемого двигателя изложена в [1, 2].

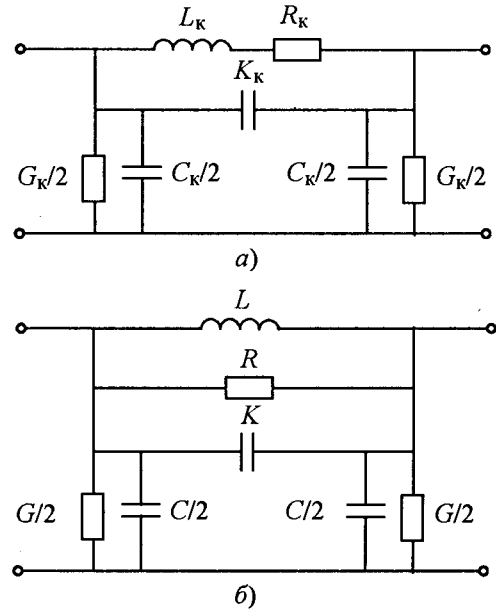


Рис.1. Схема замещения одной катушки обмотки статора АД с включением  $L_k$  и  $R_k$  последовательно (а), и параллельно (б)

**Результаты расчёта волновых параметров**

Поперечная ёмкость катушки  $C_k = 1085$  пФ;  
 продольная ёмкость катушки  $K_k = 10,44$  пФ;  
 ёмкость одной фазы обмотки статора относительно корпуса  $C_\phi = 6899$  пФ;  
 входная ёмкость фазы  $C_{вх} = 577,7$  пФ;  
 $C_{вх}/C_\phi = 8,4\%$ ;  
 при частоте 200 кГц  
 проводимость  $G_k = 3,25 \cdot 10^{-5}$  1/Ом;  
 индуктивность  $L_k = 1250$  мкГн;  
 сопротивление  $R_k = 173,92$  Ом.

**Расчёт межвитковых перенапряжений в обмотках**

Как известно, межвитковые перенапряжения –это разность волновых напряжений относительно корпуса между концами заданного элемента обмотки. В данной работе это напряжение равно разности напряжений между концами секций (витков). Расчёт межвитковых перенапряжений (ВП) в данной работе приводится с большой точностью, так как они представляют собой малую разность двух больших величин и относительные погрешности этих расчётов могут оказаться значительными.

Для АД с многовитковыми всыпными обмотками удобно пользоваться схемами рис. 1,б.

Распределение напряжений в рассматриваемой схеме описывается уравнением в частных производных гиперболического типа [1–4]:

$$K \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^2 \partial t} + \frac{1}{L} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - C \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - G \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

Здесь координата  $x$  непрерывно изменяется в пределах  $0 \leq x \leq l$ ,  $l$  – длина проводников параллельной ветви фазы обмотки. Условно принимаем за положительное направление изменение координаты  $x$ , противоположное движению падающей волны, т.е. от конца обмотки ( $x = 0$ ) к её началу ( $x = l$ ).

Все параметры, входящие в это уравнение, даны для единицы длины [1, 2].

Уравнение было решено методом Фурье с учётом зависимости параметров  $R$ ,  $L$  и  $G$  от частоты методом итераций.

Напряжение на отдельных элементах  $\Delta u(x,t)$  рассчитывается как [3]

$$\Delta u(x,t) = u(x + \Delta x, t) - u(x, t), \quad (2)$$

где  $\Delta x$  – длина заданного элемента обмотки.

Предварительно были заданы начальные и граничные условия:

– на обмотку падает волна напряжения, характеризуемая уравнением

$$u_{\text{имп}}(t) = U(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \text{ при } t > 0, \quad (3)$$

где  $U$  – амплитуда импульса, равная 10 В;  $\alpha$ ,  $\beta$  – заданные постоянные, определяющие длительность фронта  $e^{-\alpha t}$  и спада импульса  $e^{-\beta t}$ , для исследуемой машины  $\alpha = 1,2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ,  $\beta = 2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ;

– начальные условия считаются нулевыми; конец обмотки изолирован, граничные условия

для начала обмотки  $U(l, t) = u_{\text{имп}}(t) \quad (3);$

для конца обмотки ( $x = 0$ )

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Результаты моделирования для исследуемой машины представлены на рис.2–5. Характерно, что напряжения с отрицательным знаком больше на последних секциях.

Как видно из рис.2, ВП на первых секциях начинается с резкого увеличения напряжения из-за быстрого нарастания напряжения исходного импульса, а на последних секциях напряжение достигает больших значений с отрицательным знаком из-за влияния отражённой волны на ВП в конце обмотке.

На рис.3 показаны значения положительных и отрицательных пиковых напряжений на секциях обмотки при ВП.

На рис.4 показана зависимость значений отрицательных и положительных пиковых напряжений через каждые шесть витков для последней и первой секции соответственно.

На рис.5 приведены показаны распределение напряжения через каждые шесть витков и на секциях по длине параллельной ветви для разных моментов времени.

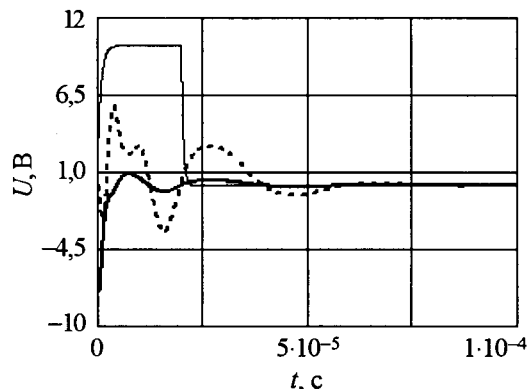


Рис.2. Волновой процесс в фазе обмотки двигателя: — – поступающий на обмотку импульс; — — – напряжение на последней катушке обмотки; --- – напряжение на первой катушке обмотки

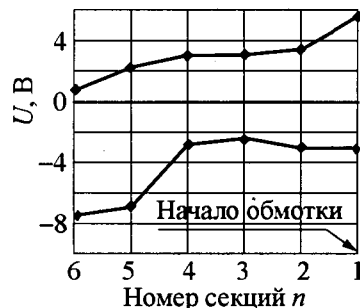


Рис.3. Значения максимальных положительных и отрицательных напряжений на секциях обмотки при волновом процессе

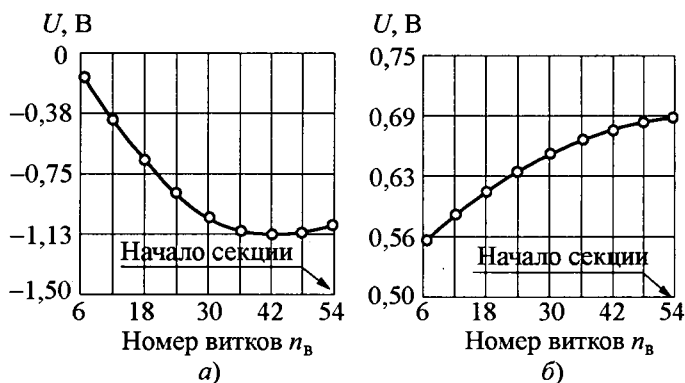


Рис.4. Значения отрицательных и положительных максимальных перенапряжений через каждые шесть витков для последней (а) и первой (б) секции

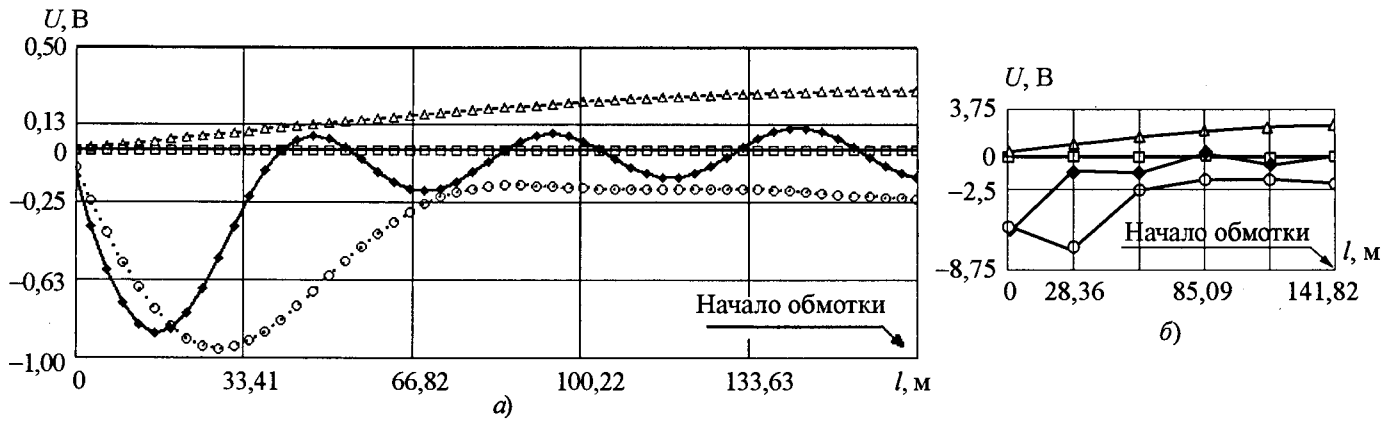


Рис.5. Распределение напряжения через каждые шесть витков (а) и на секциях (б) по длине параллельной ветви обмотки для разных моментов времени:

◆◆ -  $t = 3 \cdot 10^{-7}$  с; ○○○ -  $1,2 \cdot 10^{-6}$  с; □□□ -  $3 \cdot 10^{-4}$  с; ▲▲▲ -  $3 \cdot 10^{-5}$  с

**Выводы**

1. Представленный метод расчёта волновых параметров и межвитковых перенапряжений при импульсном питании расширяет возможности исследования и проектирования системы изоляций частотно-регулируемых электродвигателей и приводов и позволяет более правильно выбрать значения межвитковых испытательных напряжений.

2. При поступлении на обмотку АД импульсов напряжения прямоугольной формы, схожих по форме с импульсами при частотном управлении от ШИМ, в ней возникают ВП. При этом расчётные перенапряжения исследуемого двигателя составляют 0,75 исходного напряжения на последней секции с отрицательным знаком и 0,57 на первой секции с положительным знаком (рис.2, 3). Расчёт многих вариантов показывает, что распределение пиковых перенапряжений на секциях неравномерно, но оно увеличивается в сторону движения обратной волны (рис. 2, 3 и 5).

3. Значения отрицательных и положительных пиковых перенапряжений на витках в сторону противоположного движения волны уменьшаются на последней секции и возрастают на первой секции, а разность напряжений между витками первой секции небольшая, она велика на конце обмотки (рис.4).

4. Из рис.5 видно, что распределение напряжения на секциях и на витках по длине параллельной ветви для разных моментов времени

становится более равномерным с увеличением времени ВП.

5. Зависимости пиковых напряжений от номера секций (рис.3) показывают, что перенапряжения на последних и первых катушках (витках) довольно велики, поэтому при проектировании АД, питаемых от ШИМ-преобразователей, целесообразно принимать меры защиты от них.

**Список литературы**

1. Белассел Моханд-Тахар, Беспалов В.Я., Бухемис Шегат. Ёмкостные параметры и перенапряжения в обмотке асинхронного двигателя питаемого от ШИМ-преобразователя // Электротехника. 2005. №1. С.44.
2. Белассел Моханд-Тахар, Беспалов В.Я. Волновые параметры и перенапряжения в различных типах обмоток асинхронных двигателей, питаемых от ШИМ-преобразователей // Электротехника. 2006. №3. С.56.
3. Каганов З.Г. Волновые напряжения в электрических машинах. М.: Энергия, 1970.
4. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. М.: Энергоатомиздат, 1990. С.248.

**Белассел Моханд-Тахар** – сотрудник Департамента "Электротехника" Тизиузувского университета, Алжир. В 2006 г. защитил диссертацию в Тизиузувском университете, Алжир, по теме "Исследование волновых процессов и перенапряжений в асинхронных двигателях питаемых от полупроводниковых преобразователей".

**Беспалов Виктор Яковлевич** – профессор кафедры электромеханики МЭИ (ТУ). Окончил в 1960 г. электромеханический факультет МЭИ (ТУ). В 1992 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Асинхронные машины для динамических режимов работы".

# Коммутация в машинах постоянного тока с катящимся токосъёмом

АВИЛОВ В.Д., ПОПОВ Д.И.

*Представлена математическая модель коммутационного процесса в машине постоянного тока, использующей катящийся токосъём. Приведены некоторые результаты исследования представленной модели. Доказана работоспособность машины с катящимся токосъёмом.*

Замена скользящего контакта на катящийся снимает ряд существенных проблем, связанных с образованием политуры и механическим взаимодействием контактной пары. Это особенно важно, когда речь идёт о работе электрической машины в вакууме, агрессивных средах и при значительных изменениях температуры.

Учитывая эти аргументы авторы предлагают использовать другой тип контакта с коллектором – контакт качения, осуществляемый промежуточным звеном – пружинистыми роликами, находящимися между коллектором и неподвижными контактами. Новое техническое решение признано изобретением [1].

Контакт качения используется в высоких технологиях достаточно давно и показал высокую надёжность, что позволяет надеяться на положительные результаты его применения для коллекторных машин.

Коллекторно-роликовый узел (КРУ), использующий катящийся контакт, несомненно, имеет более сложную конструкцию, чем обычный, использующий скользящий контакт. Но в то же время контакт качения даёт ряд преимуществ: исключаются все дополнительные операции по обработке коллектора – он должен представлять собой цилиндр с гладкой поверхностью; отпадает необходимость в щёткодержателях и нажимном устройстве; контактный элемент, ранее представлявшийся в виде графитовой щётки, исключается, получив иное конструктивное решение; электрический контакт менее подвержен влиянию внешних механических факторов; в процессе токосъёма воздействие политуры отсутствует, так как она в новом решении не образуется; конструкция контакта позволяет управлять его коммутирующей способностью.

*Mathematical model of commutation process in direct current machine using rolling contacts is presented. Some results of investigating of the presented model are shown. Capacity to work of machine with rolling current collecting was proved.*

Для передачи тока через катящийся контакт было предложено техническое решение, представленное на рис. 1.

Снаружи коллектора устанавливается соосная с ним изоляционная цилиндрическая обойма 5, имеющая разъёмы под электрические "щётки" (контакты) 2. Упругие токопроводящие кольца (ролики) 3 помещаются в диэлектрический сепаратор 4 и равномерно располагаются между изоляционной цилиндрической обоймой 5 и коллектором 1. При этом "щётки" неподвижно закреплены в разъёмах изоляционной цилиндрической обоймы так, что они образуют контактную поверхность с токопроводящими кольцами.

В обычном КЩУ контактное сопротивление щётки с коллекторной пластиной определяется площадью их контактной поверхности. При набегании пластины на щётку уменьшается их контактное сопротивление, а при сбегании – увеличивается, тем самым при увеличении плотности тока на сбегавшем крае щётки в контур вносится разность падений напряжения набегающего и сбегавшего краёв щётки, стремящаяся уменьшить эту плотность тока, а следовательно, и ток разрыва контакта в момент окончания коммутации.

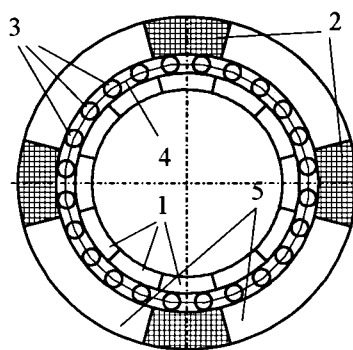


Рис.1. Коллекторно-роликовый узел:

1 – коллектор;  
2 – "щётки"; 3 – ролики; 4 – сепаратор;  
5 – обойма

Работа КРУ принципиально отличается от работы КЩУ. В этом случае контактное сопротивление "щётки" с коллекторной пластиной в каждый момент времени определяется наличием роликов, одновременно контактирующих со "щёткой" и коллекторной пластиной, а также значением сопротивления "щётки" в местах контакта.

Следовательно, для уменьшения на сбегающем крае плотности тока необходимо использовать "щётку", имеющую сопротивление, увеличивающееся к сбегающему краю по определённому закону. Пример такой зависимости, имитирующей традиционный щёточный контакт, где кривая 1 – характер изменения сопротивления контакта "щётки" от положения контакта для реверсивной машины, 2 – для нереверсивной машины, представлен на рис.2.

Для исследования процесса коммутации с новым видом контакта была разработана ма-

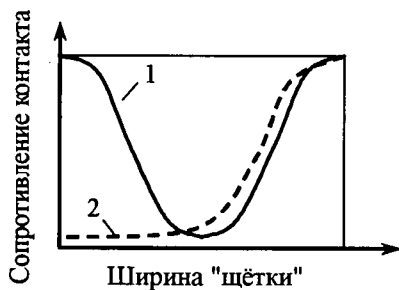


Рис.2. Распределение сопротивления "щётки" по её ширине

тематическая модель для проверки работоспособности КРУ в машине типа ПБСТ с номинальными мощностью 1,1 кВт и напряжением 110 В. Эта машина имеет простую волновую обмотку якоря, щёточное перекрытие равно 1,6, коллектор состоит из 69 пластин и имеет диаметр 111 мм.

Часть КРУ, принимающую участие в одном коммутационном периоде (под "щётками" одной полярности), для момента начала коммутации схематично можно изобразить как показано на рис.3.

Моментом начала коммутации четвертой секции будем считать момент совпадения правого края набегающей коллекторной пластины с левым краем "щётки". Момент конца коммутации – совпадение левого края сбегающей коллекторной пластины с правым краем "щётки". В промежутке времени от начального до конечного момента коммутации токи ещё шести секций также будут изменяться, так как в начальный момент три секции (с пятой по седьмую) уже коммутировали и ещё три секции (с первой по третью) будут поочередно вступать в процесс коммутации после вступления четвертой.

Схема замещения коммутируемых секций имеет известный вид и приведена на рис.4.

Решение схемы замещения (рис.4) осуществлено при следующих допущениях: исключе-

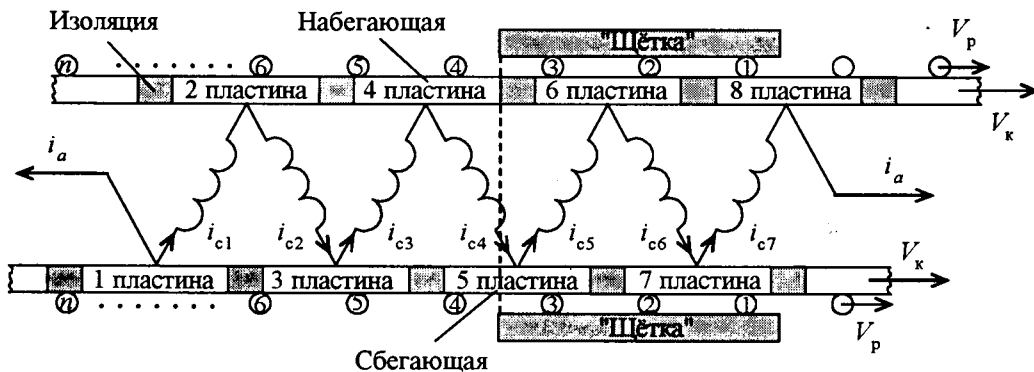


Рис.3. Система в начальный момент коммутации

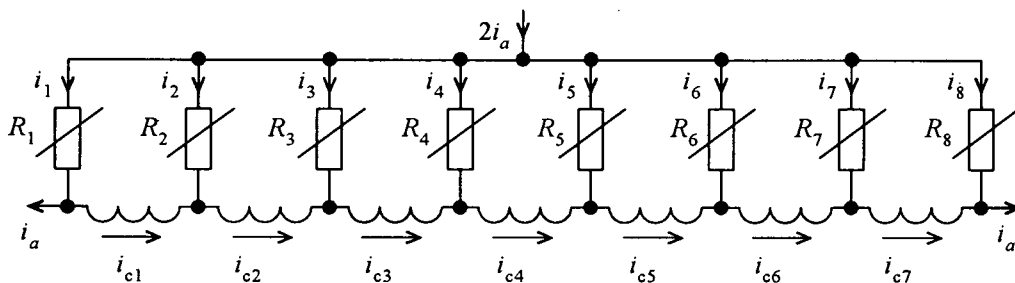


Рис.4. Схема замещения коммутируемых секций

на взаимоиндуктивная связь одновременно коммутирующих секций; коммутирующая ЭДС равна среднему значению; активное сопротивление секции равно нулю. Для данной схемы можно записать систему дифференциальных уравнений по второму закону Кирхгофа:

$$i_{j+1}R_{j+1} - i_jR_j = L \frac{di_{cj}}{dt} - E_{к.ср}, \quad (1)$$

где  $j = 1, 2, \dots, 7$  – номера токов и сопротивлений в схеме замещения по рис.4;  $i_1, i_2, \dots, i_8$  – токи, протекающие через контакт "щётки" с коллекторными пластинами соответствующих номеров;  $R_1, R_2, \dots, R_8$  – электрические сопротивления протеканию токов  $i_1, i_2, \dots, i_8$ ;  $i_{c1}, i_{c2}, \dots, i_{c7}$  – токи в секциях с соответствующими номерами;  $E_{к.ср}$  – значение коммутирующей ЭДС, средней за период коммутации;  $L$  – индуктивность секции.

По первому закону Кирхгофа имеем:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_{c1} + i_a \quad (\text{для } j=1); \\ i_j &= i_{cj} - i_{c(j-1)} \quad (\text{для } j=2,3,\dots,7); \\ i_8 &= i_a - i_{c7} \quad (\text{для } j=8), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $i_a$  – ток параллельной ветви обмотки якоря.

Для определения сопротивлений  $R_1, R_2, \dots, R_8$  необходимо учесть наличие и расположение катящихся контактов каждой коллекторной пластины со "щёткой" в течение времени коммутации. Это можно сделать в современных математических программах, используя элементы алгебры логики.

Проводимость контакта  $j$ -й коллекторной пластины со "щёткой" в каждый момент времени определяется суммой проводимостей имеющихся в данный момент катящихся  $i$ -х контактов этой пластины со "щёткой":

$$Y_j(t) = \sum_{j,i} Y_{j,i}(t), \quad (3)$$

где  $Y_{j,i}$  – проводимость  $i$ -го контакта с  $j$ -й пластиной.

Сопротивление контакта  $j$ -й коллекторной пластины со "щёткой" в функции времени

$$R_j(t) = \frac{1}{Y_j(t)}. \quad (4)$$

Для перехода от абсолютных к относительным величинам произведём в системе (1) сле-

дующие подстановки:

$$t = xT; \quad i_{cj} = 2i_a y_{cj}; \quad E_{Lср} = L \frac{2i_a}{T}, \quad (5)$$

где  $T$  – время коммутации секции;  $x$  – относительное время;  $y_{cj}$  – относительный ток  $j$ -й секции;  $E_{Lср}$  – средняя за период коммутации ЭДС самоиндукции.

После подстановок и преобразований получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dy_{c1}}{dx} &= \frac{T}{L} [(y_{c2} - y_{c1})R_2 - (y_{c1} + 1)R_1] + \frac{E_{к.ср}}{E_{Lср}} \\ &(\text{для } j=1); \\ \frac{dy_{cj}}{dx} &= \frac{T}{L} [(y_{c(j+1)} - y_{cj})R_{(j+1)} - (y_{cj} - y_{c(j-1)})R_j] + \\ &+ \frac{E_{к.ср}}{E_{Lср}} \quad (\text{для } j=2,3,\dots,6); \\ \frac{dy_{c7}}{dx} &= \frac{T}{L} [(1 - y_{c7})R_8 - (y_{c7} - y_{c6})R_7] + \frac{E_{к.ср}}{E_{Lср}} \\ &(\text{для } j=7). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Для системы уравнений (6) в программе *Mathcad* были получены решения при подстановке параметров машины ПБСТ.

На рис.5 приведены расчётные кривые тока секции с КРУ, имеющим различное число роликов по окружности коллектора без коммутирующей ЭДС ( $E_{к.ср} = 0$ , рис.5,а) и с  $E_{к.ср} = E_{Lср}$  (рис.5,б). Кривые качественно повторяют известные в публикациях расчётные кривые тока секции и их осциллограммы при традиционном коллекторно-щёточном узле [2–5].

На рис.6 показан фрагмент КРУ макетного образца на базе двигателя ПБСТ.

На основании результатов моделирования процесса коммутации для различных типов обмоток, характеристик "щёточного" контакта, параметров самого КРУ получены следующие обобщающие результаты.

1. Характер кривых тока секций с КРУ аналогичен случаю с традиционным коллекторно-щёточным узлом.

2. Специфика катящегося контакта позволяет более эффективно использовать свойства "щётки" в коммутационном процессе. Предлагаемое техническое решение позволяет управлять коммутирующей способностью "щётки".

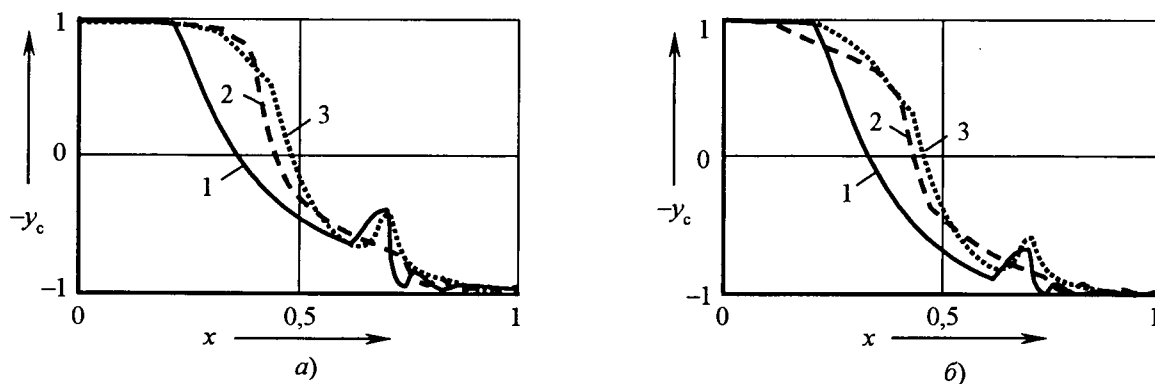


Рис.5. Кривые тока коммутации секции неререверсивной машины при  $E_{k.c.p} = 0$  (а) и  $E_{k.c.p} = E_{L.c.p}$  (б):  
1 – 120 роликов; 2 – 160 роликов, 3 – 175 роликов

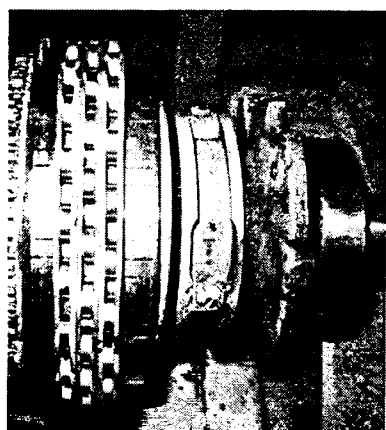


Рис.6. Ролики, установленные на коллектор машины ПБСТ

#### Список литературы

1. Пат. № 2291531 РФ. Токосъёмное устройство / В.Д. Авилов, М.П. Сергиенко, А.А. Шаров, Д.И. Попов // Бюл. 2007. №1.
2. Вегнер О.Г. Теория и практика машин постоянного тока. М.: Госэнергоиздат, 1961.
3. Карасев М.Ф. Оптимальная коммутация машин постоянного тока. М.: Транспорт, 1967.
4. Толкунов В.П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. М.: Энергия, 1979.
5. Авилов В.Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1995.

**Авилов Валерий Дмитриевич** – зав. кафедрой "Электрические машины и общая электротехника" Омского ГУ путей сообщения (ОмГУПС), доктор техн. наук, проф. Окончил в 1963 г. факультет электрического транспорта Омского института инженеров транспорта (ОмИИТ). Защитил докторскую диссертацию в 1990 г. по теме "Повышение коммутационной устойчивости крупных коллекторных машин постоянного тока (методы анализа, диагностирования и настройки коммутации)".

**Попов Денис Игоревич** – аспирант Омского ГУПС. Окончил в 2004 г. электромеханический факультет ОмГУПС.

3. Результаты исследования коммутационного процесса с катящимся токосъёмом убеждают в целесообразности создания макетного образца электрической машины с КРУ.

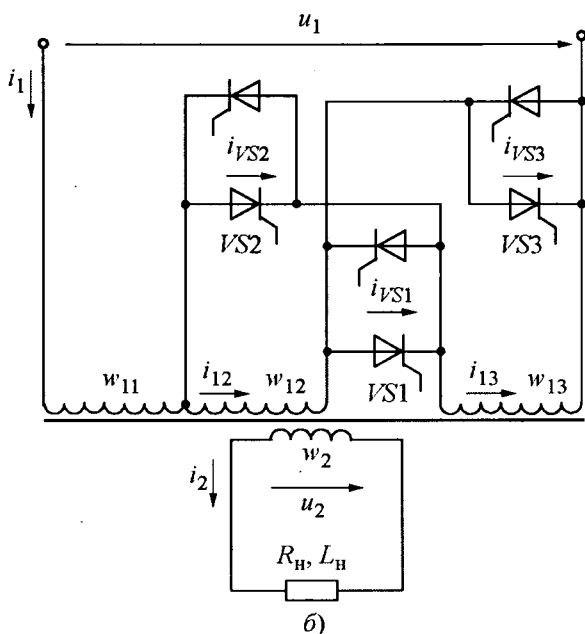
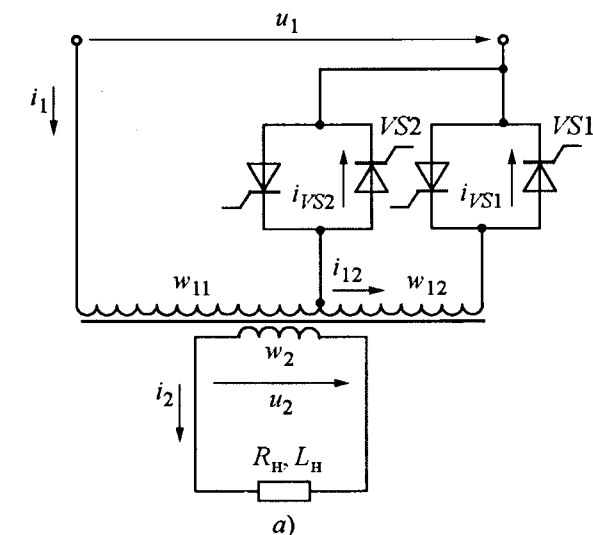
4. Результаты исследования дали возможность выйти на проектирование коллекторно-роликового узла с оптимальными параметрами, обеспечивающими токосъём с коллектора.

## Коммутация тиристоров в схемах релейно-импульсного регулирования переменного напряжения

ГУСЛИН Ю.П.

Рассмотрены процессы коммутации и расчёт их параметров в двух схемах релейно-импульсного регулирования переменного напряжения со сравнительным анализом этих схем при их использовании в машине контактной электросварки.

Processes of switching and calculation of their parameters in two circuits relay-pulse regulation of a variable voltage with the comparative analysis of these circuits are considered at their use in the machine of contact electric welding.



Релейно-импульсное регулирование (РИР) переменного напряжения осуществляется изменением коэффициента трансформации в каждом полупериоде питающего напряжения благодаря исключению из работы секций обмотки трансформатора (схема ИС, рис. 1, а) или переключению секций этой обмотки (схема ПС, рис. 1, б). Это изменение для схем ИС и ПС характеризуется соответственно отношениями:

$$\beta = \frac{w_{11}}{w_{11} + w_{12}}$$

$$\beta = \frac{w_{11} + w_{12}}{w_{11} + w_{12} + w_{13}}$$

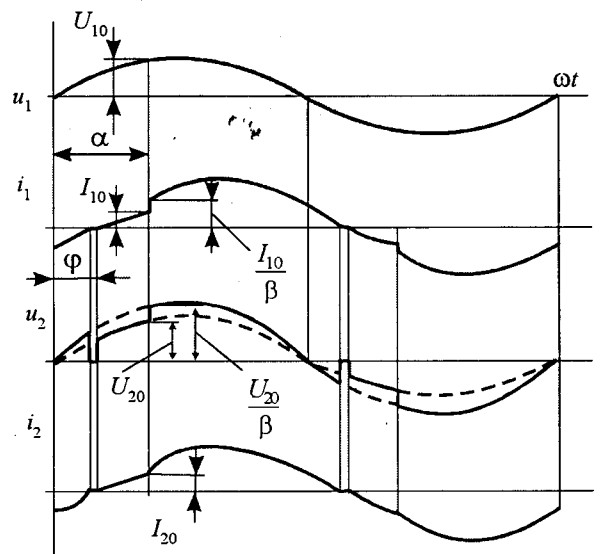


Рис.1. Схемы РИР (а – ИС, б – ПС) и временные диаграммы (в)

где  $w_{11}$ ,  $w_{12}$ ,  $w_{13}$  – числа витков соответствующих секций первичных обмоток трансформаторов, причём в схеме ПС  $w_{12} = w_{13}$ .

На рис. 1, в, где  $\omega$  – угловая частота питающего напряжения,  $t$  – время,  $\varphi$  – фазный угол,  $\alpha$  – угол регулирования, даны диаграммы, иллюстрирующие работу этих схем при допущении об идеальности сети, тиристорных ключей и трансформаторов [1]. Эти допущения предполагают, что активные сопротивления и индуктивности элементов схемы сосредоточены в нагрузке, поэтому коммутация тиристоров происходит мгновенно. В данной работе рассматриваются процессы коммутации тиристоров в схемах с реальными трансформаторами, обмотки которых

имеют конечные значения активных сопротивлений и индуктивностей, что позволяет оценивать справедливость допущения о мгновенной коммутации при расчёте характеристик РИР, а также судить об условиях работы тиристоров.

Для получения расчётных выражений выделим два интервала работы схем в одном полупериоде питающего напряжения. В первом интервале при включённых тиристорах  $VS1$  секции первичных обмоток трансформаторов соединены последовательно, а во втором интервале, который является интервалом коммутации, в схеме ИС включены тиристоры  $VS1$  и  $VS2$ , а в схеме ПС – тиристоры  $VS1$ ,  $VS2$ ,  $VS3$ , и секции  $w_{11}$  в обеих схемах подключаются к питающему напряжению, а секция  $w_{12}$  в схеме ИС и секции  $w_{12}$ ,  $w_{13}$  в схеме ПС замыкаются накоротку. В конце интервала коммутации остаются включёнными тиристор  $VS2$  в схеме ИС и тиристоры  $VS2$ ,  $VS3$  в схеме ПС.

Если пренебречь намагничивающим током трансформаторов, то для первого из выбранных интервалов получим схемы замещения на рис. 2. В этих схемах  $R_{11}$ ,  $L_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $L_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $L_{13}$  – активные сопротивления и индуктивности рассеяния секций первичных обмоток трансформаторов;  $R'_2$ ,  $L'_2$ ,  $R'_H$ ,  $L'_H$  – активные сопротивления и индуктивности вторичных обмоток трансформаторов и нагрузок, приведённые к первичным обмоткам,

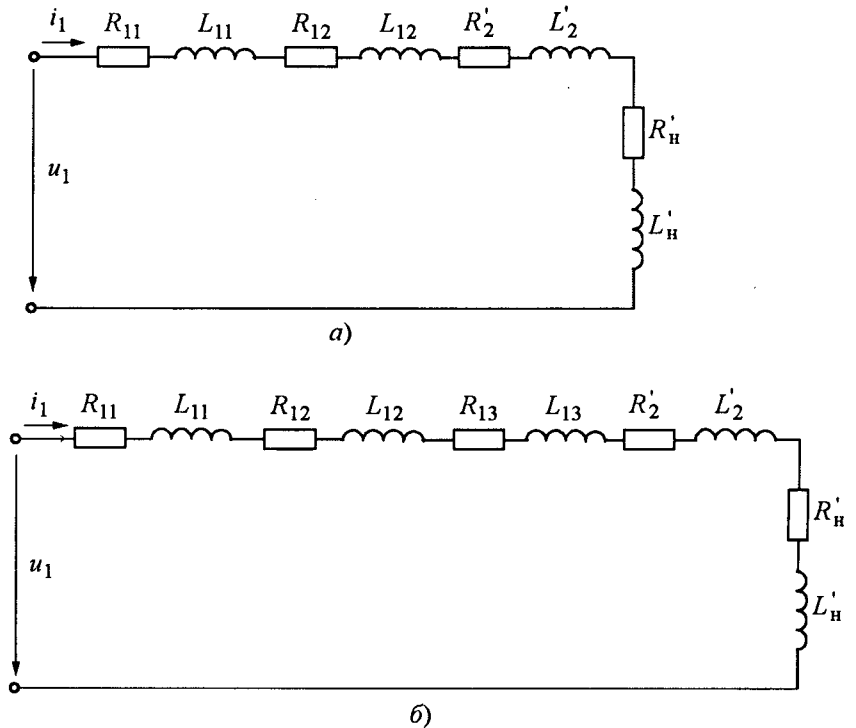


Рис. 2. Схемы замещения для интервала 1 схем ИС (а) и ПС (б)

$$R'_2 = R_2 K_T^2; \quad L'_2 = L_2 K_T^2;$$

$$R'_H = R_H K_T^2; \quad L'_H = L_H K_T^2.$$

Здесь  $R_2$ ,  $L_2$ ,  $R_H$ ,  $L_H$  – активные сопротивления и индуктивности вторичных обмоток и нагрузок;

$$K_T = \frac{w_{11} + w_{12}}{w_2} \quad \text{– для схемы ИС;}$$

$$K_T = \frac{w_{11} + w_{12} + w_{13}}{w_2} \quad \text{– для схемы ПС,}$$

где  $w_2$  – число витков вторичных обмоток трансформаторов.

Используя схемы на рис. 2, можно записать для момента времени начала коммутации тиристоров ( $\omega t = \alpha$ ) при синусоидальном питающем напряжении  $u_1$  с амплитудой  $U_{1m}$ :

$$U_{10} = U_{1m} \sin \alpha; \quad (1)$$

$$I_{10} = \frac{U_{1m}}{Z} \sin(\alpha - \varphi); \quad (2)$$

$$I_{20} = I_{10} K_T; \quad (3)$$

где

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad (4)$$

$$\varphi = \arccos \frac{R}{Z}. \quad (5)$$

Для схемы ИС

$$R = R_{11} + R_{12} + R'_2 + R'_H; \quad X = \omega(L_{11} + L_{12} + L'_2 + L'_H);$$

для схемы ПС

$$R = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R'_2 + R'_H;$$

$$X = \omega(L_{11} + L_{12} + L_{13} + L'_2 + L'_H).$$

На рис. 3 приведены расчётные схемы и соответствующие им схемы замещения для интервала коммутации. В этих схемах из неописанных ранее величин:  $R''_{12}, L''_{12}, R''_{13}, L''_{13}, R''_2, L''_2, R''_H, L''_H$  – активные сопротивления и индуктивности соответствующих секций первичных и вторичных обмоток трансформаторов и нагрузок, приведённые к секциям  $w_{11}$  рассматриваемых схем:

$$R''_{12} = R_{12} \left( \frac{w_{11}}{w_{12}} \right)^2; \quad L''_{12} = L_{12} \left( \frac{w_{11}}{w_{12}} \right)^2; \quad R''_{13} = R_{13} \left( \frac{w_{11}}{w_{13}} \right)^2;$$

$$L''_{13} = L_{13} \left( \frac{w_{11}}{w_{13}} \right)^2; \quad R''_2 = R_2 \left( \frac{w_{11}}{w_2} \right)^2; \quad L''_2 = L_2 \left( \frac{w_{11}}{w_2} \right)^2;$$

$$R''_H = R_H \left( \frac{w_{11}}{w_2} \right)^2; \quad L''_H = L_H \left( \frac{w_{11}}{w_2} \right)^2;$$

$I''_{120}, I''_{130}, I''_{20}$  – токи соответствующих секций первичных и вторичных обмоток трансформаторов и нагрузок в момент времени начала коммутации, приведённые к секциям  $w_{11}$ , (начальные условия),

$$I''_{120} = I_{10} \frac{w_{12}}{w_{11}}; \quad I''_{130} = I_{10} \frac{w_{13}}{w_{11}}; \quad I''_{20} = I_{20} \frac{w_2}{w_{11}}.$$

Первичное напряжение в интервале коммутации изменяется по выражению

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t_k + \alpha), \quad (6)$$

где  $t_k$  – текущее время интервала коммутации.

Для определения токов  $i_1, i''_{12}, i''_{13}, i''_2$  в функции времени  $t_k$  целесообразно использовать операторный метод. Записав уравнения по законам Кирхгофа и выполнив их операторное преобразование по Лапласу с учётом начальных условий, можно получить системы уравнений, решив которые и выполнив обратные преобразования, можно найти выражения для искомых токов, а по ним определить выражения для  $i_{12}, i_{13}, i_2$  в функции времени  $t_k$ :

$$i_{12} = i''_{12} \frac{w_{11}}{w_{12}}; \quad i_{13} = i''_{13} \frac{w_{11}}{w_{13}}; \quad i_2 = i''_2 \frac{w_{11}}{w_2}. \quad (7)$$

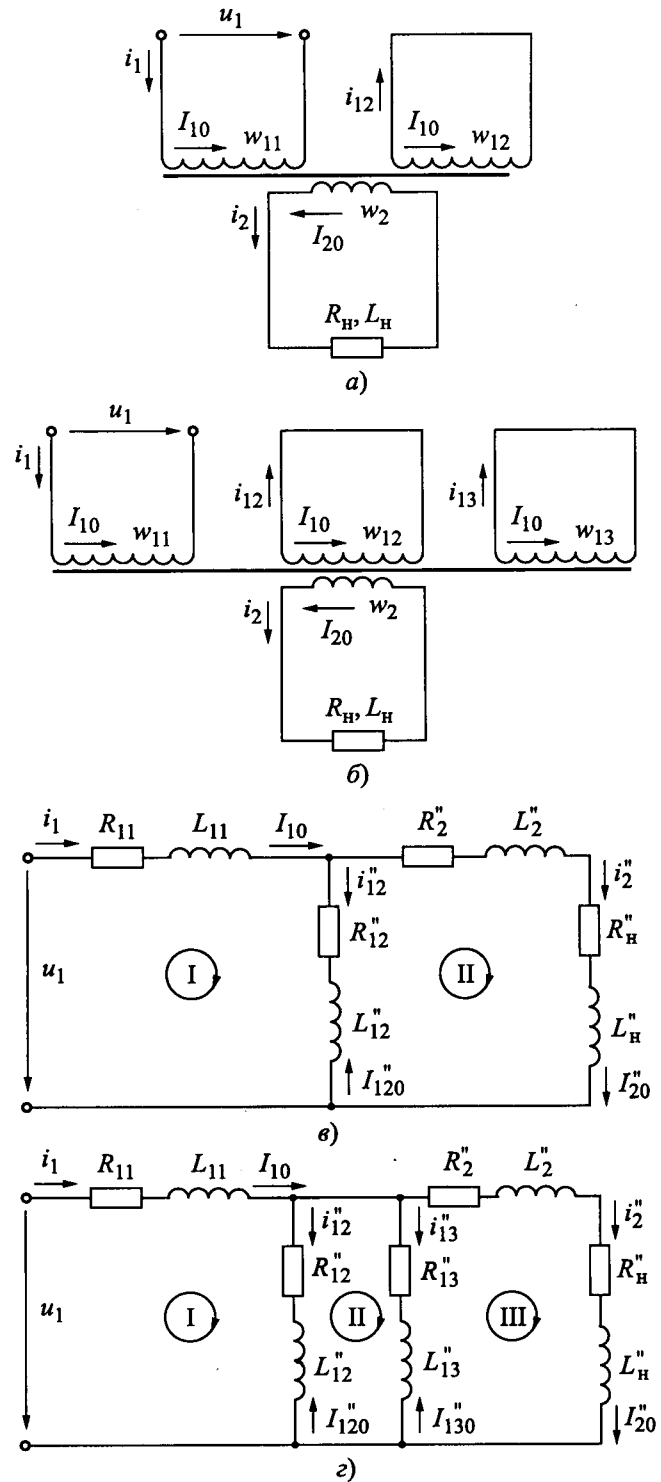


Рис. 3. Расчётные схемы и схемы замещения для интервала коммутации схем ИС (а,б) и ПС (б,з)

Коммутация заканчивается при спаде до нуля токов через тиристоры  $VSI$ . По этому условию определяется длительность интервала коммутации  $T_k$ :

– для схемы ИС

$$i_{VCI} = i_{12} = 0; \quad (8)$$

– для схемы ПС

$$i_{VCI} = i_{12} + i_{13} - i_1 = 0. \quad (9)$$

На рис. 4 приведены диаграммы, характеризующие протекание процессов в интервале  $T_k$ . Выделяя различие этих процессов в рассматриваемых схемах, можно отметить следующее.

Отношение  $w_{11}/w_{12}$  для трансформатора схемы ИС больше отношения  $w_{11}/w_{12} = w_{11}/w_{13}$  для трансформатора схемы ПС при выбранном значении  $\beta$ . Поскольку в интервале  $T_k$  этими отношениями определяются значения ЭДС секции  $w_{12}$  первого из этих трансформаторов и секций  $w_{12}, w_{13}$  второго трансформатора, то при одинаковых параметрах этих секций скорость уменьшения тока в секции  $w_{12}$  трансформатора схемы ИС будет меньше, чем в секциях  $w_{12}, w_{13}$  трансформатора схемы ПС. Кроме того, ток секции  $w_{12}$  первого из указанных трансформаторов в интервале  $T_k$  спадает до нуля, а в секциях  $w_{12}, w_{13}$  второго трансформатора – до  $I_{10}/2\beta$ , т.е. значительно меньше. По этим причинам  $T_k$  для схемы ИС будет существенно больше, чем для схемы ПС при указанных условиях сравнения. Другим отличием процессов коммутации в этих схемах является повышенное вторичное напряжение трансформатора схемы ПС в интервале  $T_k$  (рис. 4, б),

поскольку в этой схеме при коммутации к питающему напряжению оказывается подключённой только секция  $w_{11}$ , а после завершения коммутации последовательно с ней соединяются параллельно включённые секции  $w_{12}, w_{13}$ . По этой же причине в интервале  $T_k$  существенно возрастает скорость изменения магнитного потока в сердечнике трансформатора схемы ПС.

Важными показателями процесса коммутации являются отношение его длительности к длительности полупериода питающего напряжения

$$\tau_k = T_k \frac{\omega}{\pi} \cdot 100\%, \quad (10)$$

а также изменения в интервале  $T_k$  первичного напряжения и вторичного тока

$$\Delta u_{1к} = \frac{|U_{10} - u_1(T_k)|}{U_{10}} \cdot 100\%; \quad (11)$$

$$\Delta i_{2к} = \frac{|I_{20} - i_2(T_k)|}{I_{20}} \cdot 100\%. \quad (12)$$

При значениях первого из этих показателей менее 5% можно признать справедливым допущение о мгновенной коммутации тиристоров при расчёте характеристик РИР, а при значениях менее 5% двух других показателей можно существенно упростить расчёт параметров коммутации. При выполнении последнего условия процессы в интервале  $T_k$  в схемах на рис. 3, в, г можно рассматривать при действии постоянного питающего напряжения  $U_{10}$  и включённом в цепь нагрузки источнике постоянного тока  $I_{20}$  с бесконечно большим сопротивлением, что означает принятие допущения о независимости процессов коммутации от параметров вторичных обмоток и нагрузок, причём соотношения на рис. 4 строго говоря соответствуют именно такому случаю. При этом можно выполнить следующие преобразования.

При  $t_k = 0$  для схемы ИС (рис. 3, а)

$$I_{10}w_{11} + I_{10}w_{12} = I_{20}w_2; \quad (13)$$

для схемы ПС (рис. 3, б)

$$I_{10}w_{11} + I_{10}w_{12} + I_{10}w_{13} = I_{20}w_2. \quad (14)$$

При  $0 < t_k \leq T_k$  для схемы ИС

$$(I_{10} + i_{k11})w_{11} + (I_{10} - i_{k12})w_{12} = I_{20}w_2; \quad (15)$$

для схемы ПС

$$(I_{10} + i_{k11})w_{11} + (I_{10} - i_{k12})w_{12} + (I_{10} - i_{k13})w_{13} = I_{20}w_2, \quad (16)$$

где  $i_{k11}, i_{k12}, i_{k13}$  – токи коммутации или изме-

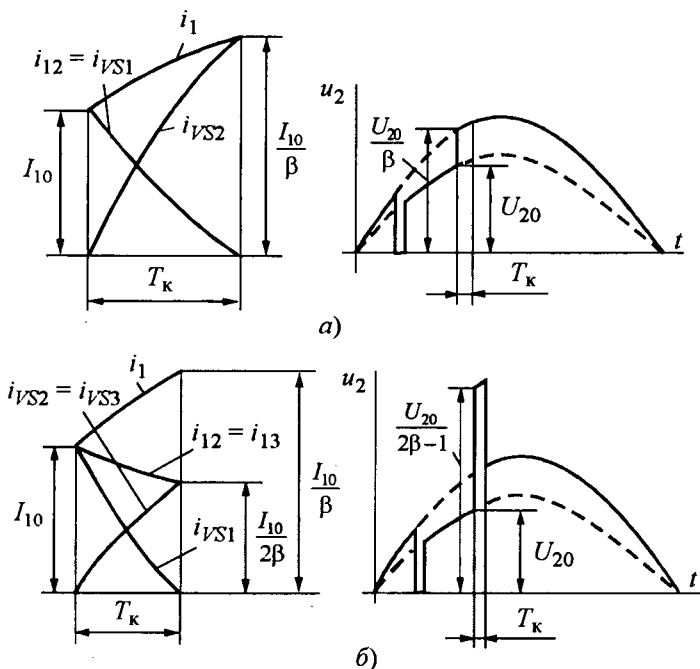


Рис. 4. Изменение токов первичной обмотки и вторичного напряжения трансформатора в интервале коммутации в схемах ИС (а) и ПС (б)

нение токов секций первичных обмоток трансформаторов.

Из (13), (15) для схемы ИС

$$i_{k12} = i_{k11} \frac{w_{11}}{w_{12}}; \quad (17)$$

из (14), (16) для схемы ПС с учётом  $w_{12} = w_{13}$

$$i_{k12} = i_{k13} = i_{k11} \frac{w_{11}}{2w_{12}}. \quad (18)$$

Для схем на рис.3, в, з при бесконечно большом сопротивлении в цепи нагрузки

$$i_{k11} = \frac{U_{10}}{R_k} (1 - e^{-\delta_k t_k}), \quad (19)$$

где

$$\delta_k = \frac{R_k}{L_k}; \quad (20)$$

$R_k = R_{11} + R_{12}''$ ,  $L_k = L_{11} + L_{12}''$  – для схемы ИС;

$R_k = R_{11} + \frac{R_{12}''}{2}$ ,  $L_k = L_{11} + \frac{L_{12}''}{2}$  – для схемы ПС

при  $R_{12} = R_{13}$  и  $L_{12} = L_{13}$ .

Токи включаемых тиристоров VS2 в схемах ИС и ПС равны сумме  $i_{k11} + i_{k12}$ , а тиристора VS3 в схеме ПС –  $i_{k11} + i_{k13}$ . Используя (17)–(20), можно найти выражения для этих сумм, а затем, взяв производную по  $t_k$  и определив максимум для полученных выражений (при  $t_k = 0$ ), получить формулы для максимальной скорости нарастания тока через включаемые тиристоры, которая является важным показателем условий их работы.

Для схемы ИС

$$\left( \frac{di_{VS}}{dt_k} \right)_{\max} = \frac{L_{10\max}}{L_k} \left( 1 + \frac{w_{11}}{w_{12}} \right); \quad (21)$$

для схемы ПС

$$\left( \frac{di_{VS}}{dt_k} \right)_{\max} = \frac{U_{10\max}}{L_k} \left( 1 + \frac{w_{11}}{2w_{12}} \right), \quad (22)$$

где  $U_{10\max} = U_{1m} (\alpha = \pi/2)$  – амплитуда питающего напряжения.

Для тока через тиристоры VS1 можно записать:

– в схеме ИС

$$i_{VS1} = I_{10} - i_{k12}; \quad (23)$$

– в схеме ПС

$$i_{VS1} = I_{10} - i_{k11} - i_{k12} - i_{k13}. \quad (24)$$

Используя (17)–(19) и исходя из условия

окончания коммутации ( $i_{VS1} = 0$  при  $t_k = T_k$ ), по (23), (24) можно найти выражения для длительности интервалов коммутации:

– в схеме ИС

$$T_k = -\frac{1}{\delta_k} \ln \left( 1 - \frac{I_{10} R_k w_{12}}{U_{10} w_{11}} \right); \quad (25)$$

– в схеме ПС

$$T_k = -\frac{1}{\delta_k} \ln \left( 1 - \frac{I_{10} R_k w_{12}}{U_{10} w_{11} + w_{12}} \right). \quad (26)$$

**В качестве примера использования полученных выражений** рассмотрим коммутацию тиристоров в схемах РИР машин контактной электросварки с питающим напряжением 380 В частотой 50 Гц. Трансформаторы с длительной мощностью 75 кВ·А и максимальным вторичным напряжением 10,6 В имеют следующие параметры:

– для схемы ИС  $w_{11} = 36$ ;  $w_{12} = 16$ ;  $w_2 = 1$ ;  $R_{11} = 0,044$  Ом;  $L_{11} = 110$  мкГ;  $R_{12} = 0,028$  Ом;  $L_{12} = 64$  мкГ;  $R_2 = 40$  мкОм;  $L_2 = 0,065$  мкГ;

– для схемы ПС  $w_{11} = 20$ ;  $w_{12} = w_{13} = 16$ ;  $w_2 = 1$ ;  $R_{11} = 0,025$  Ом;  $L_{11} = 46$  мкГ;  $R_{12} = R_{13} = 0,028$  Ом;  $L_{12} = L_{13} = 64$  мкГ;  $R_2 = 40$  мкОм;  $L_2 = 0,065$  мкГ.

Сопротивления вторичных контуров со свариваемыми деталями (сопротивления нагрузки  $Z_H$ ) рассматриваемых машин могут находиться в пределах от 400 до 2000 мкОм при  $\cos \varphi_H = 0,7 \div 0,95$ , а в режимах КЗ (при замкнутых электродах без деталей)  $Z_H \geq 200$  мкОм при  $\cos \varphi_H \geq 0,45$ .

Для приведённых значений параметров был выполнен расчёт характеристик процессов коммутации тиристоров в схемах РИР, результат которого представлен на рис.5. Для решения систем уравнений, полученных для схем на рис.3, и обратных преобразований Лапласа были использованы программы компьютерной системы Mathematica [3].

На рис.5,а приведены зависимости для значений  $\cos \varphi_H$  и  $Z_H$ , характерных для режимов КЗ, в которых реализуются максимальные  $I_{10}$  и  $\tau_k$ . Процесс коммутации должен заканчиваться до момента времени  $\omega t = \pi$ . Исходя из этого, по режиму КЗ следует определить наибольший угол  $\alpha_{\max}$ , при котором выполняется условие  $\alpha_{\max} + \omega T_k = \pi$ . Изменение  $\alpha$  в диапазоне  $\varphi \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$  обеспечит нормальную работу схемы во всех возможных режимах ра-

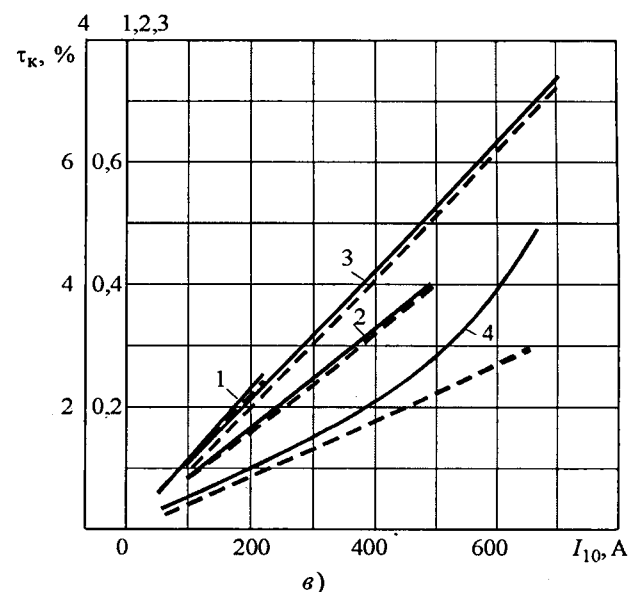
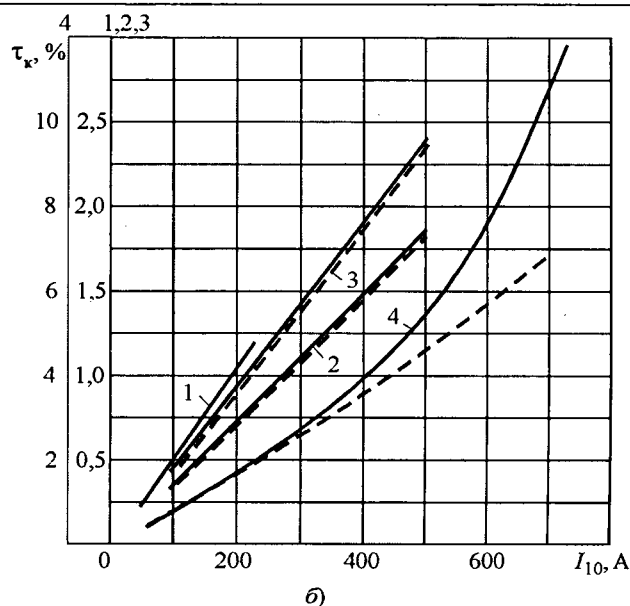
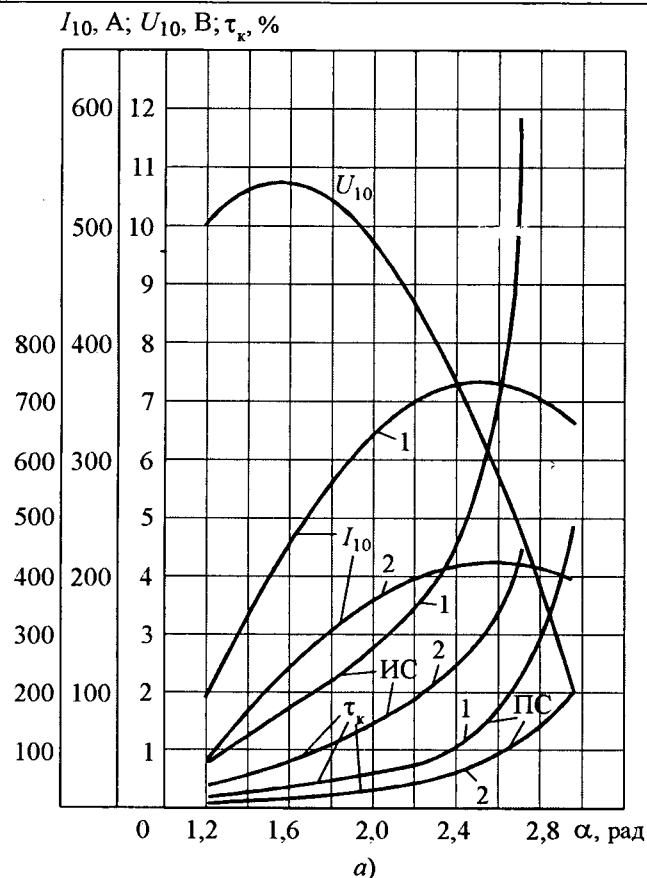


Рис.5. Результаты расчёта процессов коммутации тиристоров в схемах РИР:

а -  $\cos\varphi = 0,45$ ; 1 -  $Z_H = 200$  мкОм; 2 -  $Z_H = 400$  мкОм;  
 б - схема ИС (1 -  $\alpha = 0,8$  рад, 2 -  $\alpha = \pi/2$ , 3 -  $\alpha = 2,26$  рад, 4 -  $\alpha = 2,71$  рад);  
 в - схема ПС (1-3 -  $\alpha$  те же, что и на рис.5,б, 4 -  $\alpha = 2,96$  рад)

боты сварочной машины. При  $Z_H = 200$  мкОм и  $\cos\varphi_H = 0,45$  для машины со схемой ИС  $\alpha_{max} = 2,71$  рад, а для машины со схемой ПС  $\alpha_{max} = 2,96$  рад, т.е. в первой из этих машин реализуется меньший диапазон регулирования.

На рис.5,б,в даны зависимости  $\tau_k = f(I_{10})$ . Как показывают расчёты, при фиксированном  $I_{10}$  значение  $\tau_k$  практически не зависит от  $\cos\varphi_H$ . В рабочих режимах (режимах сварки) значения  $I_{10}$  не превысят 400 А. При этом значения  $\tau_k$  составляют не более 4% для схемы ИС и 2% для схемы ПС, поэтому допущение о мгновенном характере коммутации тиристоров при расчёте, например, регулировочных характеристик и энергетических показателей РИР, будет справедливым [1]. Кроме того, в рабочих режимах при угле регулирования менее 2,3 рад для схемы ИС и 2,5 рад для схемы ПС значения  $\Delta i_{k1}$  и  $\Delta i_{k2}$  оказываются в пределах 5%,

поэтому допущение  $u_1 = U_{10}$  и  $i_2 = I_{20}$  в течение интервала  $T_k$  в этих случаях можно считать обоснованным. Это иллюстрируется данными на рис.5,б,в, где пунктирными линиями построены зависимости  $\tau_k = f(I_{10})$  при расчёте  $T_k$  по формулам (25), (26), полученным при указанном допущении.

По формулам (21), (22) определяются максимальные скорости нарастания тока включаемых тиристоров: 4 А/мкс для схемы ИС и 8,7 А/мкс для схемы ПС.

Важно отметить, что значения  $\Delta i_{k2}$  для схемы ПС всегда меньше, чем для схемы ИС, несмотря на то, что в интервале  $T_k$  в первой из этих схем имеет место повышенное вторичное напряжение (рис.4,б). Это объясняется малыми значениями  $T_k$  в схеме ПС. Поскольку вто-

ричный ток определяет процесс протекания сварки, то можно утверждать, что повышенное вторичное напряжение не ухудшает этот процесс в машине со схемой ПС по сравнению с машиной со схемой ИС.

Подводя итог проведённому сравнению, можно сделать вывод о преимуществе схемы ПС над схемой ИС по значениям параметров коммутации. Кроме того, благодаря лучшему использованию первичной обмотки, трансформатор в схеме ПС будет меньше по габаритам и массе [2].

#### Выводы

1. Предложенную методику расчёта целесообразно использовать при анализе процессов коммутации в схемах РИР, в частности при

обосновании допущения о мгновенной коммутации тиристором.

2. Для реализации РИР в машинах контактной электросварки следует выбрать схему с переключением секций первичной обмотки.

#### Список литературы

1. Гуслин Ю.П. Два способа релейно-импульсного регулирования переменного напряжения при активно-индуктивной нагрузке // Электротехника. 2004. №3. С. 19–23.

2. Гуслин Ю.П. Релейно-импульсное регулирование в машинах контактной сварки // Автоматическая сварка. 1991. №1. С. 74–77.

3. Дьяконов В. Mathematica 4 : учебный курс. СПб.: Питер, 2001.

Гуслин Юрий Петрович – ведущий специалист отдела перспективных разработок ЗАО "Псковэлектросвар", г Псков. Окончил электромеханический факультет Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта им. академика В.Н. Образцова в 1974 г.

## Энергосберегающие схемы тягового электроснабжения железных дорог на базе сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии<sup>1</sup>

ШЕВЛЮГИН М.В.

*Описаны основные технико-энергетические ущербы в системе тягового электроснабжения железных дорог, снизить которые можно с помощью СПИН. Раскрыты основные элементы конструкции и принцип работы СПИН. На основе экспериментальных данных и данных имитационного моделирования определены порядок значений энергоёмкости СПИН и его массогабаритные показатели. Рассмотрен конкретный участок Московской железной дороги, на котором использование СПИН может быть выгодным уже сейчас. Показаны составляющие, по которым может быть оценена технико-экономическая эффективность использования СПИН.*

*There were described the main technical-power losses in the system of traction power supply which can be reduced by means of the SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). The base elements of construction and principle of SMES's working are presented. There are defined the order of power capacity of SMES and its mass and dimension parameters based on the experimental data and the data of simulation modeling. The concrete sector of the Moscow Railroad was examined on where use of the SMES can be profitable at present. There are introduced the components on which the technical-economical efficiency of the SMES's use can be evaluated.*

В последнее время энергетики всего мира уделяют большое внимание крупномасштабному промежуточному преобразованию и аккумуля

рованию энергии в энергосистемах с помощью различного типа накопителей энергии (НЭ), позволяющих сгладить потребление энергии по времени, снять пиковые нагрузки и, тем самым, уменьшить необходимую рабочую мощность основного оборудования системы.

<sup>1</sup> Печатается в порядке обсуждения.

Особенно остро эти проблемы стоят на электрифицированном железнодорожном транспорте. Следует отметить, что опытное использование некоторых типов НЭ на железнодорожном транспорте и в системах тягового электроснабжения (СТЭ) электрических железных дорог (ж.д.), в частности, уже нашло место за рубежом [1–3].

В настоящее время на электрической тяге ж.д. ОАО "РЖД" выполняется в России более 75% грузовых и более 80% пассажирских перевозок. Основная часть энергии на электрифицированных ж.д. расходуется на тягу поездов. Поэтому работы, проводимые по снижению именно этой части расхода электроэнергии, особенно актуальны. Под расходом энергии на тягу поездов в данном случае понимается суммарная энергия, отпущенная в тяговую сеть на некотором конкретном участке железной дороги, за вычетом возвращённой (рекуперированной) поездами энергии в тяговую сеть при торможении на крутых спусках или перед остановками у станций, с целью повторного её использования электропоездами в режиме тяги.

Следует отметить, что в настоящее время из-за отсутствия надёжных приёмников энергии рекуперации (инверторов или НЭ) эта энергия не используется, а гасится в реостатах электропоездов, превращаясь в тепло. В то же время при использовании энергии рекуперации с помощью инверторов или НЭ можно вернуть до 25% энергии, используемой на тягу в настоящее время, на ж.д. ОАО "РЖД" и до 35% на метрополитене.

При сравнении НЭ с альтернативными средствами принятия избыточной энергии рекуперации – выпрямительно-инверторными агрегатами, следует отметить полное превосходство НЭ. Во-первых, СТЭ ж.д. и СПЭ с некоторых пор стали абсолютно разными хозяйственными структурами и последняя крайне не заинтересована терпеть убытки из-за возврата энергии. Во-вторых, электроэнергия рекуперации, возвращаемая поездами, плохого качества. Более того, она имеет кратковременный (импульсный) характер генерации в размерах до 12 МВт и в течение 10–20 с. Такие кратковременные всплески мощности в СПЭ могут привести к негативным последствиям для других потребителей. Это подтверждается и тем, что

на Московской ж.д. нет ни одного выпрямительно-инверторного агрегата, а по всей России их осталось не более трёх, и то работающих в неизвестном опытном режиме. И наконец, НЭ помимо принятия энергии рекуперации выравнивает график энергопотребления, снижает установленную мощность всего оборудования ТП и подводящих ЛЭП, а также позволяет снизить тарифы по оплате за электроэнергию. Всё перечисленное выпрямительно-инверторный агрегат не может обеспечить в принципе.

Использование НЭ в СТЭ ж.д. должно стать основой ресурсо- и энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте. Детальный анализ всего многообразия НЭ по принципам действия и возможностям позволил сделать вывод, что для СТЭ ж.д. наибольшим образом подходят инерционные (ИНЭ), ёмкостные (ЕНЭ) и сверхпроводниковые индуктивные (СПИН) [4] накопители энергии. Для ж.д. постоянного тока СПИН является одним из самых перспективных источников пиковой мощности, так как и СПИН, и тяговое оборудование СТЭ едины по роду тока.

В странах с наибольшими темпами экономического роста (США, Япония и Китай) использованию сверхпроводниковой криогенной техники уделяется особое внимание. Сверхпроводниковые устройства уже используются или намечаются к использованию в мощных электроэнергетических системах этих стран. Особо следует отметить, что во всём мире наблюдается значительный рост производства высокотехнологичного оборудования на основе сверхпроводниковой техники. По сегодняшним оценкам и прогнозу на будущее Всемирного банка инвестиции в развитие данной отрасли растут и будут расти в геометрической прогрессии с приростом порядка 10–20% в год. Примерно в такой же пропорции растёт надёжность криогенных систем, а их стоимость снижается.

Введение СПИН в СТЭ в качестве самостоятельных структурных единиц коренным образом изменит энергообмен между источниками и потребителями электроэнергии в СТЭ. Использование уникальной возможности НЭ разделять во времени процессы генерирования и потребления энергии даёт возможность комплексно решать массу проблемных вопросов, связанных со снижением расхода электроэнер-

гии на тягу поездов, улучшением качества электроэнергии, снижением потерь энергии в СТЭ, увеличением срока службы оборудования СТЭ, уменьшением капитальных вложений в строительство новых тяговых подстанций, ЛЭП и др.

СПИН – устройство, в котором электроэнергия запасается в виде энергии магнитного поля, создаваемого незатухающим (замороженным) током в сверхпроводниковой (СП) катушке с практически нулевым активным сопротивлением. Для этой цели СП катушка СПИН размещается внутри криостата с жидким гелием при температуре около 4,2 К. Гелиевая ёмкость изготавливается, как правило, из немагнитной нержавеющей стали или других ферромагнитных материалов, чтобы устранить нагрев вихревыми токами при заряде или разряде СПИН. С другой стороны, материал должен быть достаточно прочным, чтобы обеспечить высокое внутреннее давление.

Средняя плотность тока в катушке порядка 1000 А/мм<sup>2</sup> при магнитной индукции около 5 Тл. Благодаря таким значениям плотности тока СПИНЫ являются НЭ с одним из наиболее высоких показателей удельной энергоёмкости и к тому же обладают высоким КПД – 88–98%. Ресурс работы СП катушки СПИН, в зависимости от режимов эксплуатации, может составлять свыше 10<sup>12</sup> циклов заряд-разряд. Энергия СПИН в общем виде определяется известным выражением:  $A = 0,5LI^2$ , где  $L$  – индуктивность,  $I$  – ток в СП катушке.

На данный момент самыми распространёнными видами конструкций катушек СПИН яв-

ляются катушки соленоидального типа с витками, располагающимися вокруг прямой оси, и тороидальные с витками, охватывающими центральную кольцевую линию. Первые наиболее просты в изготовлении и более технологичны, но СПИН с таким типом катушек не экологичен и имеет большие внешние магнитные поля, определяющие протяжённую зону отчуждения вблизи места установки СПИН. Второй же тип с существенно меньшими внешними полями более экологичен, но зато имеет большие массогабаритные показатели, его конструкция более сложная и требует высоких материальных и денежных затрат. Особый интерес могут представлять разрабатываемые в настоящее время СП катушки нового типа с так называемым замкнутым магнитным потоком и однородным модулем поля [5]. Свойства данного типа катушек по-настоящему начали активно исследовать сравнительно недавно. Они имеют ряд преимуществ.

Следует обратить особое внимание на сложность обеспечения эффективной связи СПИН с СТЭ, поскольку необходим особый блок их сопряжения, создаваемый на основе полупроводниковых структур, позволяющий отбирать от СПИН необходимую мощность при заданном регулируемом уровне напряжения. Одна из возможных схем присоединения СПИН к СТЭ железных дорог для выравнивания мощности, потребляемой из системы первичного электроснабжения (СПЭ), и принятия избыточной энергии рекуперации заключается в подключении его непосредственно к шинам тягового напряжения ТП (рис. 1).

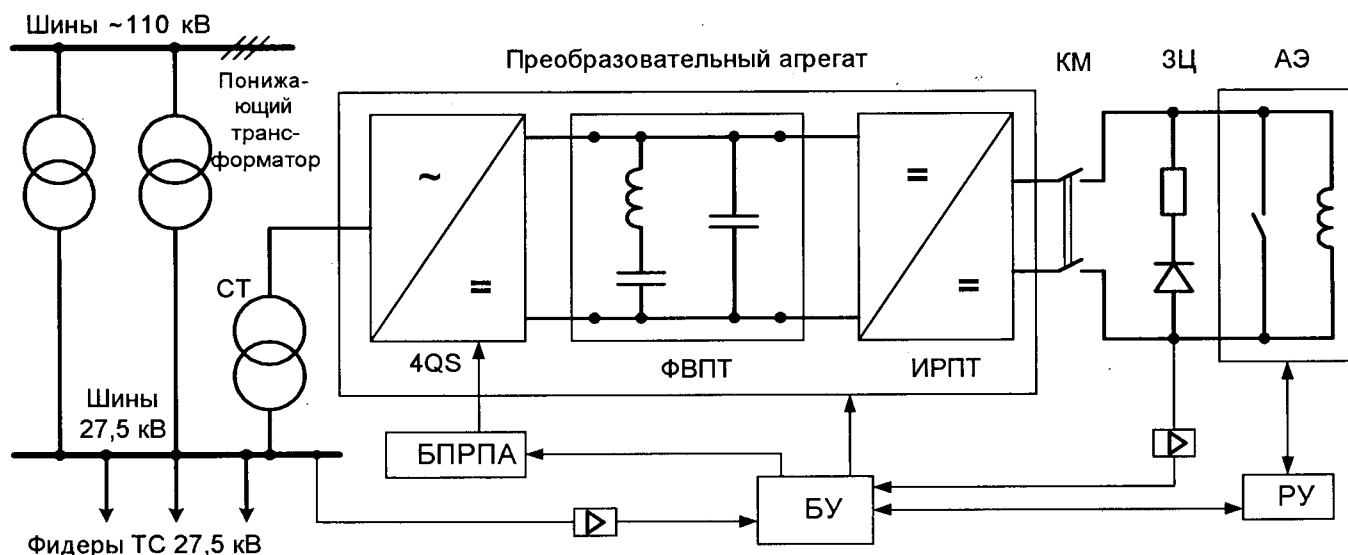


Рис. 1. Структурная схема подключения СПИН к ТП переменного тока

Аккумулирующий элемент (АЭ) через коммутационный модуль (КМ) подключается к преобразовательному агрегату (ПА). Преобразовательный агрегат (рис.2) состоит из импульсного регулятора постоянного тока (ИРПТ) и четырёхквadrантного преобразователя (4QS), разделенных контуром постоянного тока с поглощающей (фильтрующей) вставкой постоянного тока (ФВПТ). Далее ПА через трёхфазную линию подключается к согласующему трансформатору (СТ), который, в свою очередь, через разъединитель подсоединён к шинам тягового напряжения ~27,5 кВ.

На ТП постоянного тока также есть возможность подключения СПИН к шинам тяговых фидеров =3,3 кВ. В данном случае снижается установленная мощность не только преобразовательных трансформаторов ТП, но и выпрямительных агрегатов. При этом в схему СПИН должны быть внесены изменения. Возможно, вместо четырёхквadrантного преобразователя 4QS понадобится разработка более сложного ИРПТ, однако такая замена в любом случае должна значительно снизить общую стоимость СПИН.

Мощность ПА определяется в зависимости от места установки СПИН, его назначения, а также условий работы, и может составлять порядка 10–20 МВ·А. Элементная база ПА должна быть составлена на основе современных силовых IGBT-тиристоров или транзисторов, например IGBT-модулей фирмы "Mitsubishi" типа CM2400HC-34N мощ-

ностью до 4 МВ·А. Управление модулями должно осуществляться стандартными микропроцессорными контроллерами, но исключительно на основе оптоволоконной связи, так как работа ПА будет проходить вблизи мощных источников электромагнитных полей, а помехоустойчивость сетей управления ПА должна быть максимальной. Уровень рабочего напряжения ПА будет определяться в зависимости от технико-экономических показателей модулей и требований к общей надёжности ПА. Ожидается, что уровень рабочего напряжения ПА (до соединения с согласующим трансформатором) будет около 1–2 кВ.

В СПИН обязательно должен быть предусмотрен микропроцессорный блок управления (БУ), который полностью берет на себя функции управления и защиты всех узлов конструкции. Режимы заряда и разряда выбираются на основании показателей датчиков тока и напряжения, подключённых к шинам тягового напряжения и токоведущим частям на выходе ПА. От датчиков информация через усилители (□▷) передаётся на блок предварительного регулирования преобразовательного агрегата (БПРПА) и БУ. Помимо этого БУ также через датчики и усилитель следит за уровнем энергии в АЭ, а также за состоянием сверхпроводника и в случае необходимости подаёт команду рефрижераторной установке (РУ) на выработку и передачу необходимого количества хладагента.

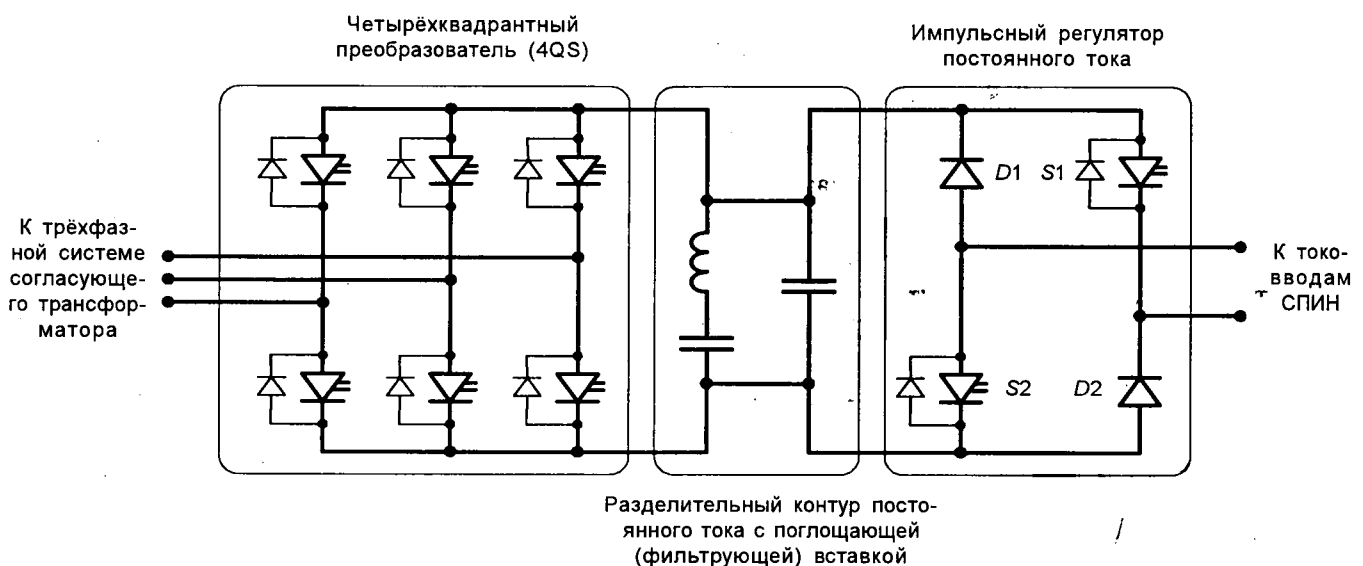


Рис.2. Схема преобразовательного агрегата СПИН для ТП переменного тока

Важной функцией БУ является регулирование и выбор режимов работы СПИН. Для эффективной работы СПИН в СТЭ необходимо иметь возможность регулирования мощности, протекающей через него, в зависимости от изменения параметров режима работы СТЭ. В связи с этим существуют активные и пассивные состояния НЭ. При формировании программного обеспечения для микропроцессорного блока управления в него закладываются алгоритмы трёх активных режимов работы СПИН, которые будут определяться в зависимости от условий работы СТЭ:

1. Заряд СПИН от ТП по ТС.
2. Заряд СПИН от рекуперирующего ЭПС.
3. Разряд СПИН на тяговую нагрузку.

В остальное время СПИН находится в режиме хранения энергии.

Оценка ситуации в СТЭ и выбор режима работы СПИН производится по уровню напряжения в тяговой сети и направлению мощности. Эффективность использования СПИН в СТЭ, подключенного непосредственно к шинам тягового напряжения ТП или же к тяговой сети вместо ТП, во многом будет зависеть от своевременного и правильного выбора режима работы. Каждый режим отличается своей спецификой. Фрагмент блок-схемы алгоритма выбора режима работы СПИН в СТЭ показан на рис.3. Выбор же режима работы будет осуществляться в зависимости от трёх основных факторов: времени суток, состояния СПИН и уровня напряжения в тяговой сети.

В зависимости от времени суток будет определяться значение мощности заряда СПИН. В дневные, утренние и вечерние часы, когда идёт интенсивное пригородное пассажирское сообщение, СПИН ориентирован на заряд энергией рекуперации. Это самый эффективный режим (особенно в часы пик) и предусматривает мощность заряда (в зависимости от СПИН) до 12 МВт. Время заряда в этом режиме составляет десятки секунд – минуты.

В ночные часы, когда движение электричек отсутствует, а избыточная энергия рекуперации незначительна, работа СПИН ориентирована на грузовые поезда и подзаряд от тяговой сети осуществляется незначительными токами. В этом случае мощность заряда СПИН значительно меньше – 100–300 кВт. Время заряда СПИН в этом режиме составляет десятки минут – часы.

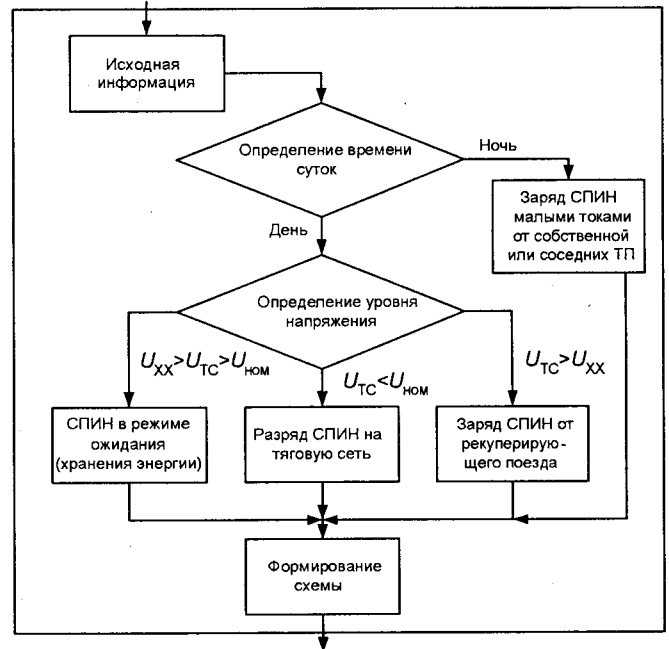


Рис.3. Фрагмент блок-схемы алгоритма выбора режима работы СПИН

При средних размерах движения для выравнивания тягового энергопотребления СПИН может потреблять мощность порядка 500–700 кВт (рис.4.).

Системные замеры показателей работы ТП "Голицино" Московской ж.д. и последующее имитационное моделирование показали, что для сглаживания энергопотребления в данном конкретном случае необходим СПИН энергоёмкостью порядка 1,26 ГДж. По Российским и

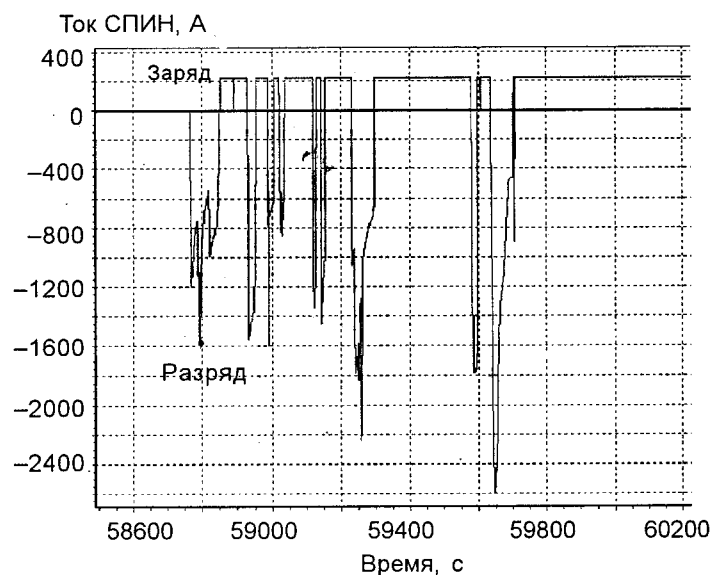


Рис.4. Моделирование работы СПИН на ТП "Голицино"

зарубежным оценкам [1,6] при энергоёмкости 350 кВт·ч (1,26 ГДж) аккумулирующий элемент СПИН может представлять собой тор из 8 катушек внешним диаметром 5,7 м, массой 7 т каждая (56 т). При этом криостат должен быть внешним диаметром 17 м и высотой 7,5 м. Объём данной конструкции будет порядка  $796 \text{ м}^3$ , а вокруг криостата должна быть обеспечена зона отчуждения диаметром около 8 м. При оценке массогабаритных параметров перспективного СПИН с катушкой тороидального типа с постоянной плотностью запаасаемой энергии (тороид с однородным модулем поля) [5] оказалось, что СП катушка с однородным модулем поля должна представлять собой видоизменённый секционный тор с обмотками, в котором диаметр равен высоте, ориентировочно 3 м, при общей массе 15 т. Криостат при этом будет иметь 7 м в диаметре и 5 м в высоту, общий объём  $192 \text{ м}^3$ . Следует отметить, что в данном случае внешние магнитные поля будут значительно меньше и зона отчуждения может составить не более 3–4 м.

Технико-экономическое обоснование (ТЭО) эффективности использования СПИН на ТП ж.д. пригородного сообщения основывается на результатах оценки технических показателей СПИН и результатов имитационного моделирования. В данном случае ТЭО будет складываться из следующих основных показателей экономии средств за счёт:

- снижения капитальных затрат на основное тяговое оборудование;
- снижения или полного отсутствия капитальных затрат на строительство подводящих ЛЭП;
- возврата энергии рекуперации;
- смены тарифа на стоимость электроэнергии.

1. При установке СПИН на ТП в значительной степени снижается её установленная мощность. Как показывает моделирование работы СПИН на ТП "Голицино" с учётом реального замеренного расхода электроэнергии, ток ТП не будет превышать 600 А. Это означает, что общая мощность данной ТП постоянного тока может составлять порядка 2 МВ·А. Принимая во внимание то, что на ТП "Голицино" в данный момент в работе находятся два тяговых агрегата общей мощностью 25 МВ·А, можно утверждать, что даже с учётом двухкратного резервирования, высвобождается порядка

20 МВ·А установленной мощности. При удельной стоимости 3600 руб/1 кВ·А экономия средств на основное тяговое оборудование мощностью 20 МВ·А с учётом составляющей ЛЭП составит около  $72 \cdot 10^6$  руб.

2. Использование СПИН на ТП гарантировано обеспечивает приём избыточной энергии рекуперации. Для пригородного сообщения значение энергии рекуперации может составлять от 12 до 21% энергии, идущей на тягу. Для данного участка ж.д. детальные исследования по точному определению энергии рекуперации не проводились, поэтому её доля принята средней, т.е. 17%. Замеры показали, что расход электроэнергии данной ТП "Голицино" составил примерно 34 МВт·ч в сутки. Отсюда можно заключить, что при средней по Московской ж.д. стоимости 1 кВт·ч – 1,75 руб. экономия за счёт возвратной энергии рекуперации на данной ТП может составить 5780 кВт·ч, т.е. 10120 руб. в сутки или  $3,7 \cdot 10^6$  руб. в год.

3. Установка СПИН в значительной степени снижает установленную мощность ТП. По данным энергосбыта стоимость электроэнергии по двухставочному тарифу в зависимости от мощности более чем в 2 раза меньше, а стоимость за потребляемую из первичной системы мощность может быть снижена в 10 раз.

Таким образом, использование СПИН на ТП в некоторых исполнениях может быть выгодно уже сейчас, со сроком окупаемости примерно 5–7 лет. Учитывая динамику роста производства высокотехнологичного оборудования на основе сверхпроводящей криогенной техники и прогноз инвестиций в развитие данной отрасли, следует отметить, что в ближайшее десятилетие с одной стороны будут определены род и технология производства СПИН для СТЭ ж.д., а с другой стороны их стоимость значительно снизится, что сделает их использование бесспорно экономически выгодным.

#### Список литературы

1. Karner J. Выравнивание нагрузки тяговых подстанций с помощью аккумуляторов энергии // *Elektrische Bahnen*. 1995. № 1/2.
2. Lechner M., Reimer K. Применение накопителя энергии на основе АБ на горной железной дороге // *Elektrische Bahnen*. 1995. №8. С. 259–264.
3. Maruyama N. Flywheel Type Electric Railway Energy Saving Substation // *Japanese Railway Engineering*. 1981. Vol.21. №2.

4. Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Оценка возможностей использования сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии в системе тягового электроснабжения электрофицированных железных дорог // Фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области железнодорожного транспорта: Сб. научн. работ МИИТ. 2002. С.237–241.

5. Клименко Е.Ю. и др. Эффективные СПИН с замкнутым магнитным потоком // Сборник аннотаций научной конференции института сверхпроводимости и физики твердого тела М.: РНЦ "КИ", 2006.

6. Черноплеков Н.А. Научно-технические и экономические проблемы сверхпроводниковых технологий для

электроэнергетики: Научн. конф. ИСФТТ и КЦИ РНЦ "Курчатовский институт". М., 2006.



Шевлюгин Максим Валерьевич – доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), канд. техн. наук. В 1996 г. закончил МИИТ. В 2000 г. на кафедре "Энергоснабжение электрических железных дорог МИИТ защитил диссертацию по теме "Проблемы использования накопителей энергии в системах тягового электроснабжения."

## Выбор параметров статического компенсатора реактивной мощности СТАТКОМ

КОШЕЛЕВ К.С., ПЕШКОВ М.В.

*Рассматриваются вопросы создания статического компенсатора реактивной мощности, являющегося устройством на базе полупроводникового преобразователя напряжения. Описана разработанная методика инженерного расчёта силовых элементов компенсатора, а также его система управления.*

*A development of static synchronous var compensator which consists of power electronic voltage converter, is described. Power components and control system design technique also presented.*

Статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ) представляет собой устройство, выполненное на базе полупроводникового преобразователя постоянного/переменного напряжения с ёмкостным накопителем электроэнергии на стороне постоянного тока [1,2].

По сравнению с традиционными тиристорными компенсаторами (СТК) рассматриваемый СТАТКОМ имеет ряд преимуществ (более высокое быстродействие, меньшие массогабаритные параметры), которые в ряде случаев применения имеют существенное значение. Кроме того недостатком СТК является уменьшение диапазона регулирования реактивной мощности при снижении напряжения в сети.

Полупроводниковый преобразователь СТАТКОМ содержит полностью управляемые ключевые элементы и способен генерировать ток любой фазы по отношению к напряжению сети. Напряжение на стороне переменного тока преобразователя генерируется методом широтно-

импульсной модуляции. При этом быстродействие регулирования напряжения и тока СТАТКОМ составляет 1–2 такта модуляции, что обуславливает высокое быстродействие регулирования реактивной мощности. Система управления СТАТКОМ выполняется на базе микропроцессорных устройств, что обеспечивает точность и надёжность управления.

На рис.1 представлена типовая структурная схема СТАТКОМ. Его силовая часть состоит из следующих элементов: трёхфазного четырёхквadrантного преобразователя напряжения на полностью управляемых ключевых элементах, фазных реакторов на стороне переменного тока преобразователя, конденсаторной батареи на стороне постоянного тока.

В компенсаторах малой и средней мощности преобразователь обычно имеет трёхфазную двухуровневую топологию схемы. В системах большой мощности и высокого напряжения используются преобразователи, имеющие много-

уровневую или многоячейковую топологию схемы.

Для расчёта и выбора элементов силовой части СТАТКОМ необходимо определить его задачи по компенсации реактивной мощности или стабилизации напряжения сети. В преобразователе с трёхфазной двухуровневой топологией схемы число уровней фазного напряжения равно двум, поэтому ток и напряжение компенсатора создаются методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для снижения содержания паразитных модуляционных гармоник в фазном токе [3]. Частота коммутации должна составлять 1–1,5 кГц по условию обеспечения приемлемого качества фазного тока компенсатора, без значительного увеличения потерь в преобразователе.

Одним из важных этапов является расчёт параметров накопительной конденсаторной батареи (КБ). Сегодня существует большое количество типов конденсаторов с различными электрическими характеристиками, конструкциями и областями применения. Правильные расчёт и выбор КБ во многом определяют надёжную работу устройства в целом. Основные данные на расчёт параметров КБ: уровень пульсаций напряжения на батарее, обусловленных генерацией реактивной мощности, и номинальное рабочее напряжение. Расчёты пульсаций тока КБ осуществлялись с использованием

программы математического моделирования MATLAB. В основном пульсации напряжения на КБ обусловлены несимметрией напряжения сети. Пульсация тока в КБ в зависимости от уровня несимметрии фазных токов оценивается по формуле

$$I_{C2m} = \frac{5\sqrt{2}}{8K_m} \left( I_A - \frac{I_B + I_C}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} (I_C - I_B) \right), \quad (1)$$

причём несимметрия задаётся разными значениями амплитуд тока в фазах.

Значение ёмкости КБ, при которой амплитуда пульсаций не превышает 2% номинального напряжения конденсаторной батареи  $U_d$ ,

$$C_d = \frac{I_{C2m}}{0,02U_d}. \quad (2)$$

В преобразовательной технике в качестве накопителей энергии широкое применение находят электролитические конденсаторы. Их существенный недостаток – снижение ёмкости с ростом частоты протекающего через них тока. Поэтому при выборе конденсатора, необходимо учитывать также ряд специфических параметров, таких как эквивалентная индуктивность и тангенс угла диэлектрических потерь на заданной частоте.

Выбор IGBT-транзисторов преобразователя осуществляется исходя из максимальных значений коммутируемого тока и напряжения. В непроводящем состоянии к транзистору прикладывается напряжение накопительной батареи.

Для обеспечения надёжной работы транзисторов в переходных режимах необходимо их выбирать с запасом по максимальному значению коммутируемого тока в 1,5–2 раза. Температура кристалла полупроводника не должна превышать допустимого значения, которое рассчитывается по мощности тепловых потерь проводимости коммутаций с использованием разработанной математической модели, учитывающей мгновенное значение тока транзистора. По мощности тепловых потерь определяются также параметры системы охлаждения вентиляей.

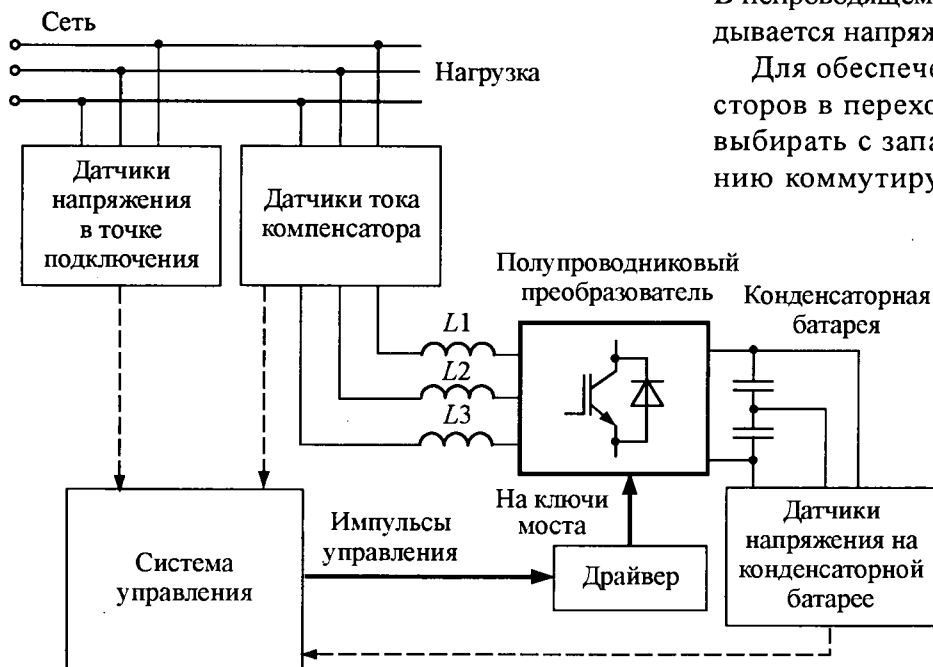


Рис. 1. Упрощённая структурная схема СТАТКОМ

**Расчёт параметров фазного реактора.**

Исходными данными являются: индуктивность реактора; номинальное значение основной гармоники фазного тока и высшие гармоники тока. Расчёты числа витков  $w$  и отношения высоты реактора к диаметру  $K_1$  выполнены с использованием программы MATHCAD, которая позволяет выбрать следующие параметры: средний диаметр катушки, толщину обмотки, длину обмотки, массу меди, мощность потерь.

**Задача системы управления СТАТКОМ** заключается в регулировании реактивной мощности, выдаваемой или потребляемой устройством. Если напряжение преобразователя СТАТКОМ совпадает по фазе с напряжением сети, то его ток имеет только реактивную составляющую, т.е. происходит обмен с сетью реактивной мощностью. Реактивная мощность СТАТКОМ имеет ёмкостный характер, если амплитуда напряжения преобразователя больше амплитуды напряжения сети, и индуктивный характер, если его амплитуда меньше амплитуды напряжения сети.

На рис.2. приведена блок-схема системы управления СТАТКОМ, реализованная на микроконтроллере (МК). На МК поступают сигналы со следующих датчиков: линейных напряжений сети, напряжения на накопительном конденсаторе, датчиков токов СТАТКОМ, датчиков токов сети. Синхронизация с напряжением сети фазы  $A$  осуществляется по фазе и частоте при помощи алгоритма фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Сигнал синхронизации используется в программе преобразования координат  $abc/dq$  фазных напряжений сети. Далее по специальной программе вычисляются значения проекций вектора напряжения преобразователя СТАТКОМ ( $U_{C_d}$ ,  $U_{C_q}$ ). Проекция вектора напряжения преобразователя вычисляются с учётом задания активной и реактивной мощности СТАТКОМ, причём задание определяет пользователь. Если  $d$ -составляющая напряжения преобразователя  $U_{C_d}$  больше  $d$ -составляющей напряжения сети  $U_{S_d}$ , СТАТКОМ генерирует мощность ёмкостного характера, если меньше, то наоборот. Если  $q$ -составляющая напряжения преобразователя  $U_{C_q}$  больше нуля, то СТАТКОМ потребляет активную мощность, если меньше, то наоборот. Программа обратного преобразования координат  $dq/abc$  осуще-

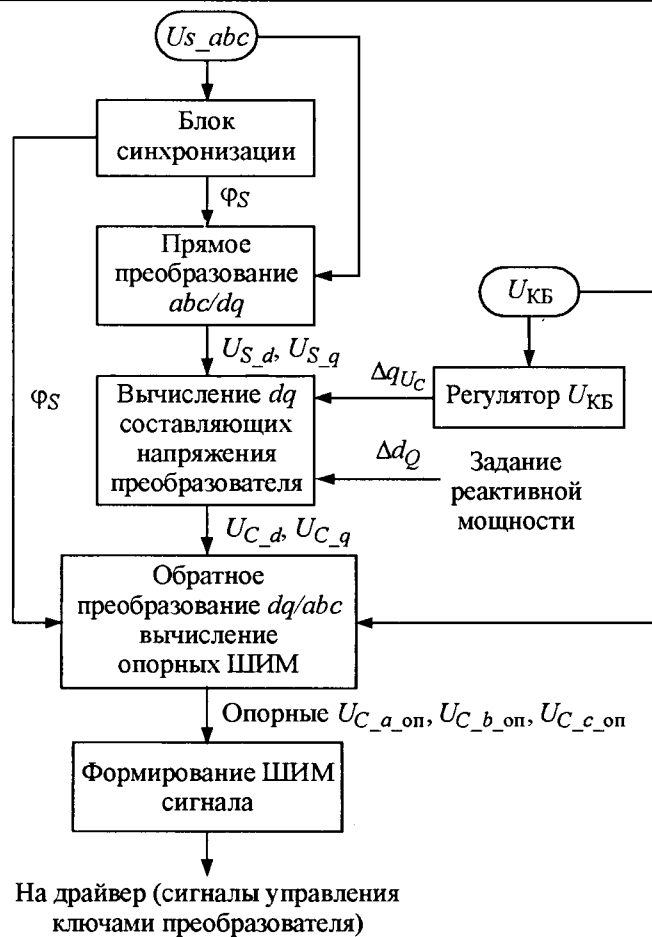


Рис.2. Блок-схема системы управления СТАТКОМ

ствяет обратную операцию для получения напряжения преобразователя в стационарной трёхфазной системе координат. Для поддержания напряжения на КБ используется ПИ-регулятор, на вход которого поступает разница значений текущего напряжения КБ ( $U_{КБ}$ ) и напряжения уставки ( $U_{c_{уст}}$ ). На выходе регулятора формируется требуемое значение приращения  $q$ -составляющей напряжения преобразователя  $\Delta q U_c$ , которое поступает в программу вычисления  $dq$ -координат напряжения преобразователя. В результате генерируемое напряжение преобразователя сдвигается по фазе относительно напряжения сети, что создаёт требуемый поток активной мощности из сети для поддержания напряжения КБ на заданном уровне. Используя значение реактивной мощности задания  $Q$  СТАТКОМ, вычисляем значение  $\Delta d Q$ , на которое надо изменить  $d$ -составляющую напряжения сети  $U_{S_d}$  для получения  $d$ -составляющей напряжения преобразователя  $U_{C_d}$ . Программа вычисления опорного сигнала

ШИМ-модулятора вычисляет опорные  $U_{C\_a\_оп}$ ,  $U_{C\_b\_оп}$ ,  $U_{C\_c\_оп}$ , которые записываются в регистры аппаратного модуля ШИМ МК, генерирующего сигналы управления драйверами транзисторов. Генерируемое напряжение зависит от значения опорной ШИМ и напряжения на КБ, поэтому опорные сигналы масштабируются к напряжению на КБ.

Экспериментальные исследования проводились на макете СТАТКОМ, созданном в ОАО "ВНИИЭ", при участии кафедры "ЭиЭА" ГОУВПО "МЭИ (ТУ)". Макет предназначен для непосредственного подключения к трёхфазной сети 0,4 кВ, 50 Гц. Установленная мощность макета 250 квар. Номинальное действующее значение основной гармоники тока макета 360 А. В макете использованы силовые IGBT-модули типа FZ80012KF4 фирмы "EUPEC" на номинал тока 800 А и напряжения 1200 В. КБ в цепи постоянного тока состоит из 24 конденсаторов типа К-50-77 1500 мкФ, 450 В и имеет суммарную ёмкость 9000 мкФ и максимальное рабочее напряжение 900 В. Фазные реакторы имеют исполнение воздушного типа, индуктивность 350 мкГн. Цифровая часть системы управления представляет собой готовую микропроцессорную плату "Starter Kit" с микроконтроллером XC167CI фирмы "Infineon Technologies AG". Для получения информации о работе макета использовался программный комплекс MATLAB, который поддерживает программное обеспечение связи с COM портом ПК. На рис.3 показан опыт перехода из режима генерации мощности индуктивного характера в режим генерации мощности ёмкостного характера. Масштаб оси абсцисс графиков – 54 единицы соответствуют 0,02 с.

Результаты экспериментального исследования подтверждают высокое быстродействие регулирования реактивной мощности СТАТКОМ. Переход из режима генерации индуктивной мощности в режим генерации мощности

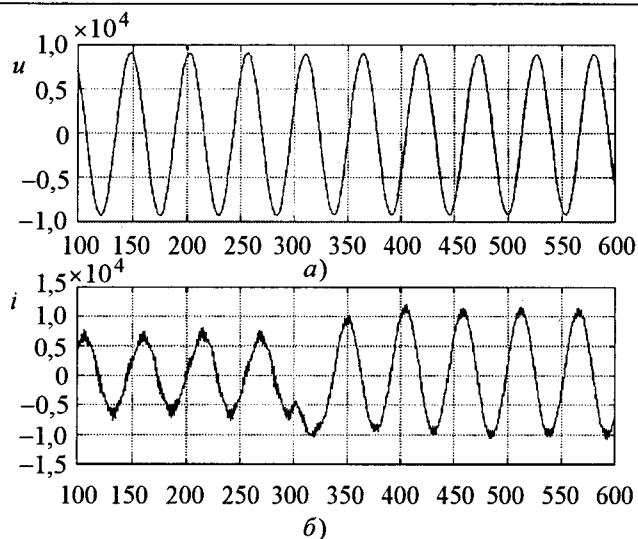


Рис.3. Переход из режима генерации индуктивной мощности в режим генерации мощности ёмкостного характера:

а – напряжение сети фазы А (28 ед/В); б – ток СТАТКОМ (74 ед/А)

ёмкостного характера (рис.3) занимает менее 0,04 с, что превышает по быстродействию регулирования другие устройства компенсации реактивной мощности.

#### Список литературы

1. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НЦ ЭНАС. 2000.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Новосибирск: НГТУ, 2004.
3. Steffen В. Recent developments of high power converters for industry and traction applications // IEEE transactions on power electronics. 2000. Vol.15, N.6.

Кошелёв Константин Сергеевич – научный сотрудник филиала ОАО "НТЦ электроэнергетики – ВНИИЭ", аспирант кафедры ЭиЭА МЭИ. Окончил ИЭТ МЭИ в 2004 г.

Пешков Максим Валерьевич – научный сотрудник ОАО "НТЦ электроэнергетики – ВНИИЭ". Окончил ИЭТ МЭИ в 2003 г.

# Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе ёмкостных накопителей энергии

БРОДСКИЙ Ю.А., ПОДАРУЕВ А.И., ПУПЫНИН В.Н., ШЕВЛЮГИН М.В.

*Описаны наиболее перспективные примеры использования ёмкостных накопителей энергий в системе тягового электроснабжения. Определены функции накопителей. Приведены принципиальная схема и основные технические характеристики устройства применительно к метрополитену. Показана предварительная технико-экономическая эффективность использования ёмкостных накопителей энергии на конкретной линии Московского метрополитена.*

*The most perspective examples of use of capacitor energy storage units in system of traction electrosupply are described. Functions of stores are certain. The basic scheme and the basic characteristics of the device with reference to underground are resulted. Preliminary technical and economic efficiency of use of capacitor energy storage units on a concrete line of the Moscow underground is shown.*

За последние годы дефицит электромощностей в Москве значительно вырос, при этом стремительно увеличивается энергопотребление метрополитена, который является самым мощным потребителем электроэнергии в городе. В настоящее время всё острее встает вопрос энергосбережения на электрифицированном городском транспорте и в метро особенно.

Электроподвижной состав (ЭПС) метрополитена характеризуется крайне неравномерным графиком потребления электрической энергии. Потребление энергии особенно значительно в период пуска и разгона поездов, менее значительно в периоды их равномерного движения и отсутствует на выбеге, т.е. в периоды движения поездов по инерции. Вследствие этого тяговые подстанции (ТП) метрополитена непрерывно испытывают значительные колебания нагрузки, вызываемые суммированием нагрузок фидеров. При пиковых нагрузках, возникающих при наложении пусковых токов по фидерам друг на друга, снижается напряжение на шинах ТП и в тяговой сети на промежуточных станциях метро, расположенных между двумя соседними ТП, и особенно сильно в конце консольных участков. Это замедляет процессы пусков поездов на них и приводит к дополнительным потерям электрической энергии в системе тягового электроснабжения (СТЭ). По названным причинам силовое оборудование ТП

метрополитена имеет излишнюю установленную мощность, необходимую для покрытия пиковых нагрузок.

Кинетическая энергия движущихся поездов, пропорциональная сумме произведений квадратов их скоростей на массу в момент начала торможения, в настоящее время не рекуперирована в сеть, а превращается в электрическую энергию, которая в процессе торможения выделяется в виде тепла в тормозных реостатах вагона. На протяжении десятков лет не удалось решить проблему повторного использования энергии рекуперации ввиду отсутствия гарантированного приёмника энергии.

Всех указанных недостатков можно избежать, оснастив сеть СТЭ метрополитена ёмкостными накопителями энергии (ЕНЭ), которые принимали бы избыточную энергию рекуперации при торможении, с последующим возвратом её в СТЭ при пуске и разгоне поездов. В данном случае, с одной стороны, экономится энергия, идущая на тягу поездов (как показывают замеры это порядка 35%), с другой стороны, снижается нагрузка на ТП, а с третьей, улучшаются климатические условия в подземных станциях, что особенно актуально в последнее время.

Для принятия энергии рекуперации ЕНЭ может устанавливаться на ТП, в середине фидерных зон при централизованной системе питания,

на консоли и непосредственно на борту ЭПС. С точки зрения энергообмена использование бортовых ЕНЭ на ЭПС для принятия энергии торможения является идеальным. Однако массогабаритные показатели существующих накопительных систем сейчас не позволяют аккумулировать всю энергию рекуперации на ЭПС. Именно поэтому в настоящее время представляется целесообразным применение ЕНЭ в стационарном исполнении.

Основные элементы ЕНЭ показаны на схеме рис. 1:

1. Батарея молекулярных конденсаторов (БК).
2. Преобразователь постоянного тока П (на максимальный ток рекуперации) для связи БК с шинами ТП или тяговой сетью.
3. Система датчиков контроля тока (ДТ1, ДТ2) и напряжения (ДН1 и ДН2) совместно с системой регулирования (СР), формирующей команды на управление работой ЕНЭ.
4. Быстродействующий выключатель (БВ) для физического подключения ЕНЭ и защиты его оборудования от токов короткого замыкания.

Особенность работы представленной схемы заключается в промежуточном накоплении энергии в электромагнитном дросселе с последующей её передачей в ёмкость, что позволяет в значительной степени повысить эффективность работы всего устройства. Подробнее данное техническое решение описано в [2].

Вне зависимости от места стационарной установки ЕНЭ в СТЭ управление его работой обеспечивается специальной системой регулирования (СР на рис. 1), получающей информацию от ДН1 на входе преобразователя П и ДН2

на входе к батарее БК, а также, соответственно, датчиков ДТ1 и ДТ2.

При установке ЕНЭ на тяговой подстанции его подключение к шинам 825 В ТП, а через них и к рекуперирующему поезду, осуществляется автоматически при достижении на входе ЕНЭ (на шинах 825 В ТП) уровня напряжения, несколько более высокого, чем максимальное значение напряжения выпрямительных агрегатов ТП. При достижении напряжения БК максимально допустимого уровня СР запирает преобразователь и, тем самым, прерывает приём энергии рекуперации. Если при этом на линии отсутствуют поезда, способные принять неотданную энергию рекуперации, то силовая схема рекуперирующего поезда автоматически мгновенно переведёт приём энергии рекуперации на тормозные реостаты вагонов поезда (режим следящего рекуперативно-реостатного торможения).

Возврат энергии, запасённой в БК ЕНЭ, происходит при снижении напряжения на шинах 825 В ТП ниже определённого уровня, говорящего о том, что начался пуск поезда, разгрузив, тем самым, смежные подстанции.

Преобразователь в ЕНЭ осуществляет передачу энергии рекуперации из тяговой сети в БК и обратно и регулирует в зависимости от режима работы и состояния СТЭ значение мощности. Максимальная мощность преобразователя предварительно определена на уровне порядка 3 МВт. Данное устройство представляет собой преобразователь постоянного тока с двухсторонним переменным коэффициентом трансформации на базе современных си-

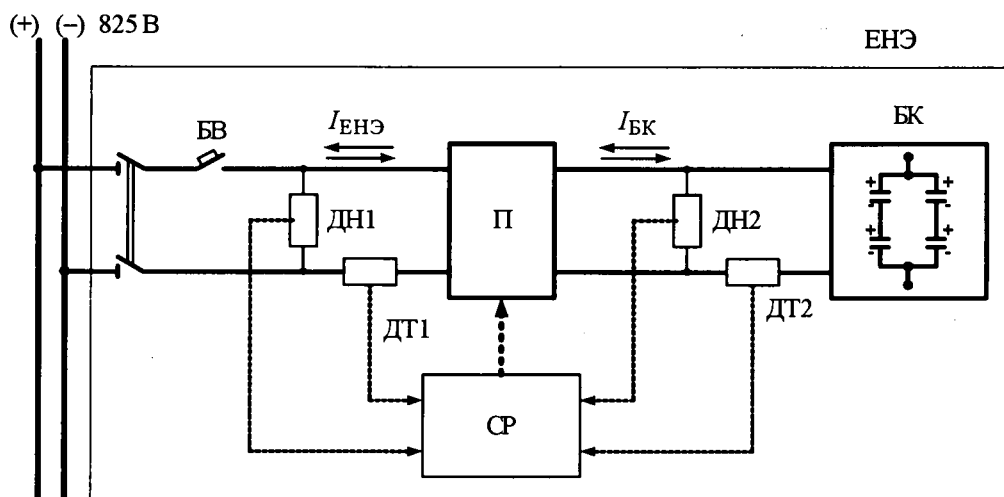


Рис. 1. Принципиальная схема ЕНЭ на ТП

ловых IGBT модулей 12–17 класса с промежуточным индуктивным звеном. Преобразователь выполняет 4 важные функции:

– заряд конденсаторов ЕНЭ непосредственно от тяговой сети крайне неэкономичен, так как КПД заряда составит лишь 50%; в связи с этим в преобразователе предусмотрен промежуточный индуктивный накопитель, который позволяет получить КПД заряда выше 85%;

– на выходе, т.е. в тяговой сети, преобразователь стабилизирует необходимый уровень напряжения с регулированием отдаваемой мощности;

– для повышения коэффициента использования энергоёмкости ЕНЭ преобразователь позволяет разряжать БК с регулируемой мощностью до задаваемого уровня напряжения, что позволяет снизить мёртвый объём накопителя до 25%;

– преобразователь в сочетании с собственной системой управления способен выполнять функции защиты оборудования ЕНЭ.

Предполагается, что БК будет состоять из электрохимических конденсаторов отечественной фирмы "Элтон", имеющих напряжение единичного модуля 16 В и ёмкость 6000 Ф. Средний порог энергии рекуперации одного поезда составляет 48 МДж. Предварительное имитационное моделирование показало, что для гарантированного принятия основного объёма энергии рекуперации (с учётом межпоездного обмена на зоне) на ТП необходим энергетический буфер в 1,5 раза больше, чем энергия рекуперации одного поезда. С учётом КПД ЕНЭ ( $\eta = 85\%$ ) мёртвого объёма БК (25%), мощности КБ в диапазоне рабочих напряжений и возможности частичного выравнивания графика нагрузки, энергоёмкость БК на среднестатистической ТП Таганско-Краснопресненской линии получается равной 80–90 МДж на ТП.

В общем виде характеристики БК выглядят следующим образом:

Тип системы .....	4×60×10 ЭК303
Диапазон рабочих напряжений, В .....	96–480
Ёмкость, Ф .....	400
Полная запасаемая энергия (максимальная), МДж .....	184
Запасаемая энергия в диапазоне рабочих напряжений, МДж .....	140
Обменная энергия, отдаваемая с максимальной мощностью в диапазоне рабочих напряжений, МДж .....	80

Внутреннее сопротивление, мОм .....	27
Номинальная мощность преобразователя, МВт .....	2,4
Масса аккумулирующего элемента, т .....	9,6
Объём аккумулирующего элемента, м <sup>3</sup> .....	13,5
Эффективность ЕНЭ ( $E_d/E_c$ ) в цикле заряда разряда .....	$\geq 0,85$

Предварительные технические параметры ЕНЭ были определены для среднестатистической ТП Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена. Однако следует учесть, что условия и показатели работы СТЭ на различных линиях изменяются в широких пределах (в зависимости от расстояний между ТП, профиля пути, размеров движения и пр.). Поэтому конструкцию ЕНЭ принято выполнять модульной (БК+П), состоящей из нескольких стандартных агрегатов (рис. 2 и 3). Предложенная модульная конструкция позволяет наиболее оптимально подобрать необходимую обменную энергию и мощность ЕНЭ практически для любого участка Московского метрополитена. Принцип выбора основных параметров тяговых агрегатов, т.е. энергоёмкости и мощности, основывается на специфике функционирования отдельных элементов и учитывает номинальные показатели по напряжению и току конденсаторов и IGBT-структур, потери, массогабаритные показатели и пр. Подробнее это показано в [1].

ЕНЭ вне зависимости от места установки и выполняемых функций, отвечает следующим основным требованиям:

1. Обладает большой функциональной и эксплуатационной надёжностью, имеет гарантированный срок службы не менее 15 лет.
2. Устойчив к эксплуатационным перенапряжениям, вызываемым работой коммутационных аппаратов ТП.
3. Обеспечивает стабильную работу в диапазоне температур от –40 до +50°С.
4. Требует минимума обслуживания.
5. Имеет приемлемую, экономически оправданную стоимость.

Экономическая эффективность использования ЕНЭ в СТЭ метрополитена оценивается с учётом:

- экономии за счёт использования энергии торможения ЭПС;
- сокращения затрат на тяговое оборудование ТП за счёт снижения установленной мощности ТП;

140 МДж (240 шт.)

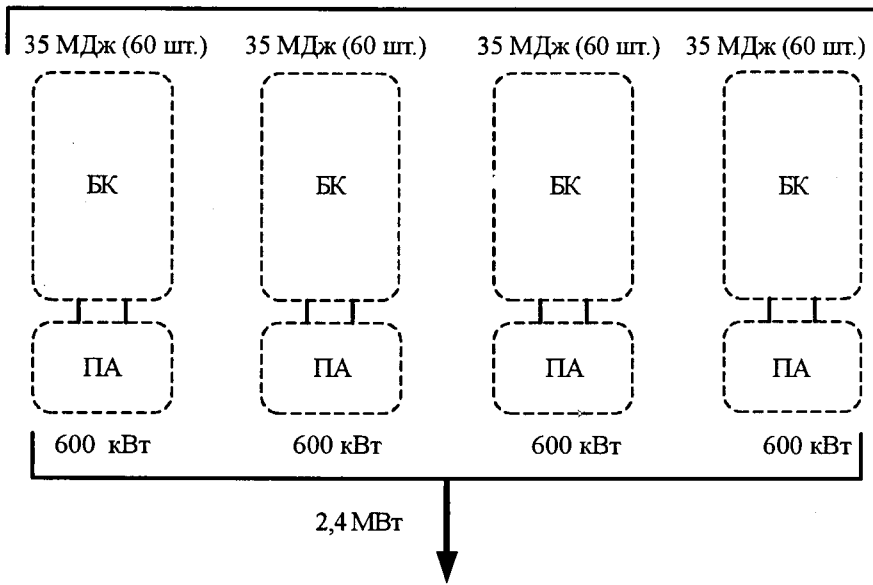


Рис. 2. Модульная конструкция ЕНЭ

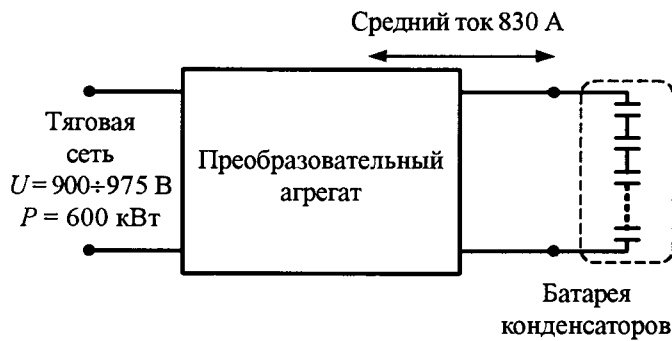


Рис.3. Стандартный модуль БК + ПЕНЭ:

$U_{БК} = 960 \div 480 \text{ В}$ ;  $A_{БК \text{ полн}} = 46 \text{ МДж}$ ;  $A_{БК \text{ доступн}} = 35 \text{ МДж}$ ;  $A_{БК \text{ дост. } 600 \text{ кВт}} = 20 \text{ МДж}$ ;  $C_{БК} = 100 \text{ Ф}$ ;  $R_{БК} = 0,108 \text{ Ом}$ ;  $V_{БК \text{ чистый}} = 1008 \text{ л}$

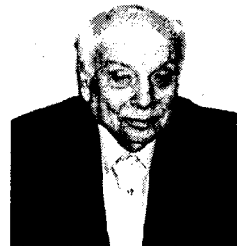
- стабилизации уровня напряжения в контактной сети постоянного тока при интенсивном движении электропоездов;
- увеличения пропускной способности участка пути за счёт снижения нагрузки на ТП;
- экономии за счёт снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций, связанных с перегрузкой тяговой сети;
- использования энергии, запасённой в ЕНЭ для аварийного передвижения электропоездов до станции в случае выхода из строя питающих пунктов внешнего энергоснабжения и обесточения тяговой сети.

Предварительная технико-экономическая оценка эффективности внедрения системы ЕНЭ в СТЭ показала, что срок окупаемости опытного образца будет составлять примерно 2,5 года.

Список литературы

1. Клинов В.Ю., Бродский Ю.А., Подаруев А.И. и др. Системы тягового электроснабжения метрополитена с ёмкостными накопителями энергии // Материалы V Международной конференции по автоматизированному электроприводу. СПб., 2007. С.447–449.

2. Пат. на полезную модель № 53826. Зарядное устройство для ёмкостного накопителя энергии / В.Н. Пупынин, М.В. Шевлюгин. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. 27.05.2006. Приоритет от 23.12.2005.



Бродский Юрий Аркадьевич – директор научно-производственного центра ОАО "Электропривод". В 1955 г. закончил МЭИ.



Подаруев Аркадий Иванович – заместитель директора научно-производственного центра ОАО "Электропривод", чл.-кор. АЭН, доктор электротехники. В 1960 г. закончил Всесоюзный заочный политехнический институт.



Пупынин Владимир Николаевич – профессор кафедры "Энергоснабжение электрических железных дорог" МГУ ПС (МИИТ), доктор техн. наук, академик Академии транспорта ПФ. В 1949 г. закончил МИИТ.



Шевлюгин Максим Валерьевич – ведущий инженер ОАО "Электропривод", НПЦ-27, доцент МИИТ, канд. техн. наук. В 1996 г. закончил МИИТ.

# УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЗАЩИТЫ

## Зондирование воздушных линий электропередачи локационным методом<sup>1</sup>

МИНУЛЛИН Р.Г., ПЕТРУШЕНКО Ю.Я., ФАРДИЕВ И.Ш.

*Рассматриваются особенности зондирования локационным методом линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 6–35 кВ, имеющих древовидную топологию, и напряжением 110 кВ и выше, имеющих линейную структуру. Показаны способы распознавания рефлектограмм при наличии КЗ, однофазного замыкания на землю и обрыва проводов ЛЭП. Обсуждаются возможности локационного метода зондирования ЛЭП.*

*The hallmarks of probing of electricity trans-mission lines (ETL) 6–35 kV voltage with diversified structure and 100 kV and higher voltage ETL with linear structure are assessed. The ways of recognition of reflectograms in case of biphasic short-cuts, monophasic short-cuts on earth and ETL ruptures. The spectrum of possibilities of location method of ETL probing is discussed.*

Сегодня перед электроэнергетикой России стоит серьезнейшая проблема – значительный физический и моральный износ используемого оборудования. Средний технический уровень установленного подстанционного оборудования в Единой национальной электрической сети России по многим позициям соответствует оборудованию, которое эксплуатировалось в ведущих странах мира 20–30 лет назад. В новых условиях хозяйствования, приведших к рыночным отношениям между производителями и потребителями электроэнергии, проблемы эксплуатации изношенного электрооборудования и энергосбережения становятся весьма актуальными [1–4].

Как показывает статистика, в сетях средней энергосистемы годовое количество повреждений линий электропередачи (ЛЭП) исчисляется сотнями, а в питающихся от неё распределительных сетях – тысячами. Большую часть повреждений воздушных линий составляют КЗ и обрывы. Причиной их возникновения могут быть естественные и искусственные условия. При этом определение места повреждения (ОМП) и восстановление поврежденных участков электролиний сети являются наибо-

лее сложными и длительными технологическими операциями.

Особо остро эта проблема стоит для электролиний напряжением 6–35 кВ. Затруднения возникают из-за того, что в распределительных сетях применяется режим изолированной нейтрали, кроме того, они имеют разветвленную древовидную топологию. Поэтому методы диагностики, успешно используемые для электролиний напряжением 110 кВ и выше, имеющих глухозаземленную нейтраль, в данном случае неприменимы.

Главным требованием при ОМП в электрических сетях является скорейшее восстановление питания отключившихся токоприемников при минимизации затрат труда, времени и средств на осуществление поиска. Поэтому необходима эффективная система оперативной диагностики и постоянного мониторинга состояния электрических сетей в сочетании со своевременным профилактическим ремонтом линий, которая приведет к сокращению количества аварий и времени ОМП и, следовательно, к уменьшению финансовых потерь из-за недопуска электроэнергии потребителям.

Информационный поиск и анализ технической литературы показали, что ни в России, ни в СНГ, ни за рубежом проблема оперативной диагностики состояния распределительных

<sup>1</sup> Печатается в порядке обсуждения.

электросетей в настоящее время до конца не решена. Разнообразие видов и характеров повреждений пока не позволило найти какой-либо универсальный метод диагностики, который бы одинаково успешно обнаруживал КЗ и обрывы проводов электролиний и другие неисправности. Отсутствие прогрессивных методов дистанционного ОМП с использованием последних достижений науки и техники затрудняет оперативное обнаружение повреждений электролиний (особенно в осенне-весенние и зимние периоды) [5].

Все это требует разработки действенного метода диагностики и мониторинга состояния электролиний распределительных сетей напряжением 6–35 кВ. Желательно, чтобы этот метод мог применяться и для линий напряжением 110 кВ и выше, имеющих линейную структуру. При этом необходимо, чтобы метод был дистанционным, оперативным, универсальным и многофункциональным [5].

Целью данной работы является физико-техническое обоснование и разработка метода диагностики состояния воздушных электролиний распределительных сетей напряжением 6–35 кВ и линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше. Метод должен соответствовать перечисленным требованиям.

При выполнении работы решались следующие задачи:

- анализ существующих методов диагностики воздушных линий электропередачи;
- рассмотрение особенностей локационного способа диагностики состояния электролиний, обоснование его выбора и условий применения для дальнейших исследований;
- выбор способа подключения приборов локационного зондирования (рефлектометров) к линиям электропередачи;
- разработка методики обнаружения повреждений (обрывы и КЗ) проводов воздушных линий электропередачи;
- разработка методики обнаружения однофазных замыканий проводов воздушных линий электропередачи на землю;
- разработка методики обнаружения неоднородностей электролиний (загрязнённые изоляторы, гололёдные образования, кабельные вставки);
- оценка влияния помех на условия импульсного локационного зондирования;
- разработка методологии диагностики воз-

душных линий электропередачи локационным зондированием.

Были рассмотрены виды повреждений линий электропередачи и существующие методы их местоопределения. После обсуждения особенностей низкочастотных и высокочастотных методов был выбран способ импульсного локационного зондирования. Этот способ может быть применён для обнаружения повреждений воздушных электролиний с древовидной и линейной топологией и удовлетворяет требованиям, перечисленным выше [6–9].

В результате анализа современных аппаратных средств локационного зондирования (рефлектометров) зарубежного и российского производства, предназначенных для определения места повреждения электролиний [10, 11], в качестве измерительного инструмента выбраны рефлектометры РЕЙС-105Р и РЕЙС-205 производства фирмы СТЭЛЛ, г. Брянск, (рис. 1).

Разработана методика зондирования электролиний и исследованы импульсные реакции неоднородностей воздушных электролиний, знание которых необходимо для успешного распознавания рефлектограмм импульсного локационного зондирования [12–16].

Изменение формы зондирующего импульса положительной полярности после отражения от конца линии в зависимости от вида и значения нагрузки показано на рис. 2 [15–17].

На рис. 2 (I) видно, что чем больше неоднородность линии отличается от волнового сопротивления линии, тем больше значение отражённого импульса, и что при обрыве провода отражённый импульс сохраняет свою положительную полярность, а при КЗ меняет её на противоположную отрицательную.

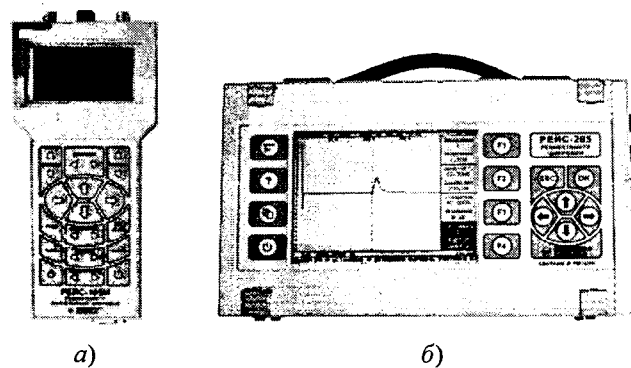
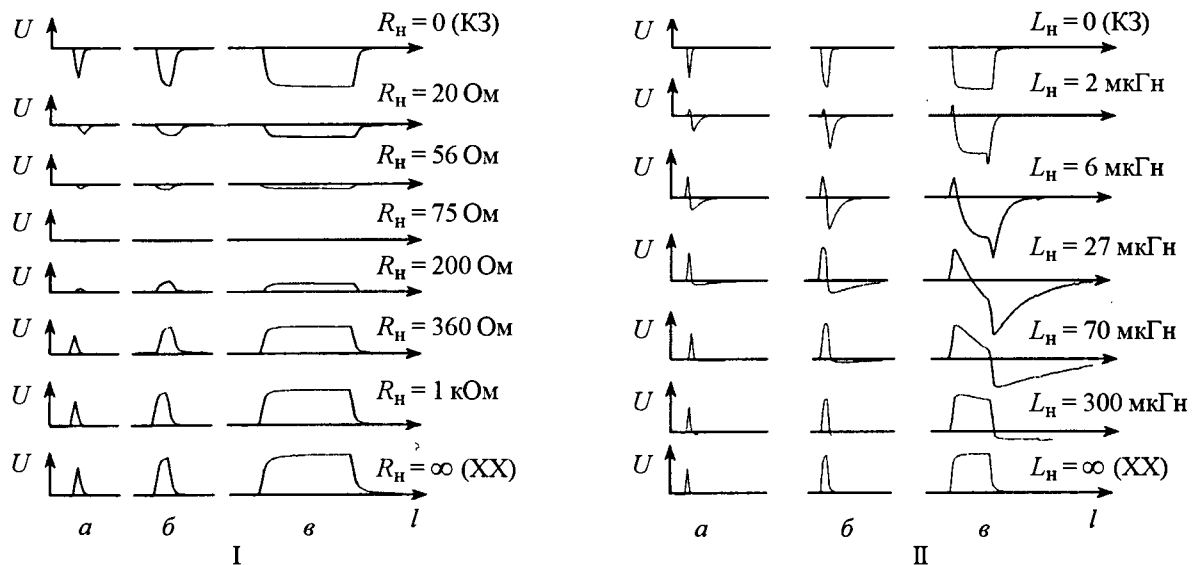


Рис. 1. Внешний вид рефлектометров: а – РЕЙС-105Р; б – РЕЙС-205



**Рис. 2.** Зависимость формы отражённых импульсов от изменения значения резистивной (I) и индуктивной (II) нагрузки  $R_H$  и  $L_H$  соответственно на конце кабельной линии при длительностях зондирующего импульса: а – 0,05 мкс; б – 0,1 мкс; в – 0,5 мкс

Электролинии присоединяются к обмоткам трансформаторов, поэтому исследовались зависимости формы отражённых импульсов напряжения  $U$  от изменения индуктивной нагрузки  $L_H$  на конце кабельной линии длиной  $l = 107$  м с волновым сопротивлением  $75$  Ом (рис. 2, II). Индуктивности трансформаторов, используемых в энергосистемах, в большинстве случаев превышают  $70$  мкГн, поэтому положительный зондирующий импульс после отражения от них всегда будет положительным [15–17].

Путём изменения длительности  $\tau$  зондирующего импульса показано, что оптимальной длительностью для данной длины линии является  $\tau = 0,1$  мкс (рис. 2, I, б, и 2, II, б), так как импульс за этот интервал времени успевает дорасти до своего максимального уровня при существующей проводимости линии.

Подключение ответвления к линии можно рассматривать как присоединение ёмкостной нагрузки, а также как параллельное присоединение ответвления с волновым сопротивлением, уменьшающим общее волновое сопротивление в месте присоединения. Поэтому положительный импульс, после отражения от места присоединения ответвления, будет всегда отрицательным, причём амплитуда и форма отражённых импульсов будут меняться в обратной закономерности по сравнению с индуктивной нагрузкой (рис. 2, II). Ответвления вносят существенные затухания в линию, а возникшие отражённые и переотражённые импульсы ус-

ложняют рефлектограмму. Поэтому отмеченные закономерности в изменениях формы и амплитуды отражённых импульсов используются при распознавании рефлектограмм локационного зондирования электролиний с древовидной топологией, каковыми являются электролинии распределительных сетей напряжением  $6$ – $35$  кВ [15–17].

Разработаны методики подключения рефлектометра к электролиниям при отсутствии и наличии напряжения на них. Отдельно рассмотрены особенности подключения рефлектометра к линиям напряжением  $6$ – $10$  кВ, обычно не имеющих систем высокочастотной обработки, и к линиям напряжением  $35$  кВ и выше, которые имеют в своём составе фильтры присоединения, конденсаторы связи и высокочастотные заградители. Измерения на действующих электролиниях показали, что наличие или отсутствие напряжения на них на результаты локационного зондирования не влияет [18].

Контроль работоспособности ЛЭП сводится к своевременному обнаружению возникших в ней повреждений. Это могут быть КЗ и обрывы проводов. При контроле электролиний с линейной конфигурацией с помощью рефлектометра импульсы, отражённые от мест КЗ и обрывов, на рефлектограммах различаются уверенно и однозначно по полярности импульса (как будет показано далее).

Однако распознавание рефлектограмм электролиний с древовидной топологией, каковыми

являются распределительные сети напряжением 6–35 кВ, является достаточно сложной процедурой.

На рис. 3 представлена рефлектограмма модели электролинии с двумя ответвлениями. Модель линии длиной 83 м выполнена кабелем РК75-9-12, концы ответвлений и линии разомкнуты. Зондирующий импульс *A* обычно имеет положительную полярность, в данном случае его длительность  $\tau = 0,027$  мкс.

На рис. 3 участки линии и соответствующие им участки рефлектограмм соразмерны и приведены в одном масштабе. Поясняющие надписи иллюстрируют способ логической расшифровки рефлектограммы путём распознавания импульсов. При положительном зондирующем импульсе от мест присоединения ответвлений отражаются импульсы отрицательной полярности (импульсы *B* и *Г*), от разомкнутых концов ответвлений – положительной полярности (импульсы *В* и *Д*), от разомкнутого конца линии – положительной полярности (импульс *Е*).

На рис. 4 приведён пример исследования случаев обрыва и КЗ проводов на воздушной ЛЭП напряжением 10 кВ, где представлены схема присоединения рефлектометра РЕЙС-105Р к двум фазным проводам воздушной линии по схеме "фаза – фаза" (*а*) и рефлектограммы при обрыве (*б*) и КЗ (*в*) проводов на конце линии в точке *Б*.

Измерения выполнялись на территории Пригородного РЭС Приволжских электрических

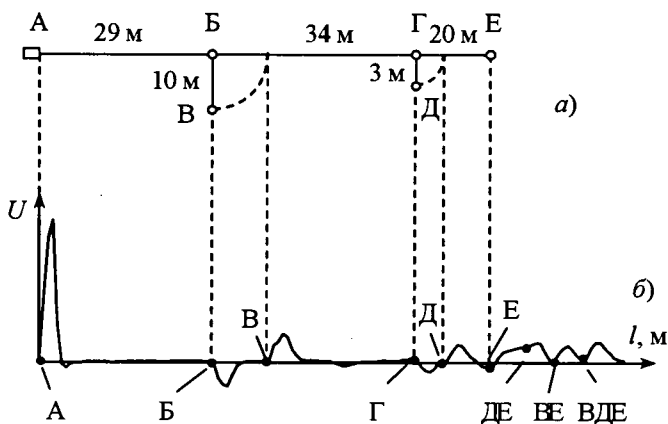


Рис. 3. Схема модели электролинии с двумя ответвлениями (*а*) и её рефлектограмма (*б*):

*Б* – отражение от места подключения первого ответвления; *Г* – отражение от места подключения второго ответвления; *В* – отражение от конца первого ответвления; *Д* – отражение от конца второго ответвления; *Е* – отражение от конца линии

сетей ОАО "Татэнерго" (фидер №23 подстанции "Аэропорт"). Длина линии 8890 м, провода АС-70, линия находилась в обесточенном состоянии.

Параметры, установленные на рефлектометре во время зондирования: амплитуда импульса  $U = 3,5$  В; длительность импульса  $\tau = 0,5$  мкс. Зондирование обычно осуществляется положительными импульсами, поэтому на рис. 3 и 4 импульсы, отражённые от места обрыва или от разомкнутого конца линии, имеют положительную полярность и приблизительно совпадают по форме. При КЗ отражённые импульсы также совпадают в обоих случаях по форме, но имеют отрицательные полярности.

Если линия имеет несколько ответвлений, то распознавание соответствующей ей рефлектограммы усложняется из-за большого количества переотражённых импульсов, которые суммируются и во времени и по амплитуде. Тогда из рефлектограммы, снятой после появления повреждения, вычитается рефлектограмма, снятая до его появления.

Методика применения разностного способа иллюстрируется примером на рис. 5, где представлены результаты локационного зондирования воздушной ЛЭП 10 кВ длиной 1425 м (фидер №10 подстанции "Аэропорт") импульсами  $t = 0,25$  мкс по схеме "фаза–фаза".

По изменениям рефлектограмм  $U(l)$  на рис. 5, в, д, ж, которые регистрировались при очередном замыкании проводов от начала линии на расстояниях  $l = 185, 690$  и  $1125$  м соответственно, установить место замыкания весьма затруднительно. Но если из этих рефлектог-

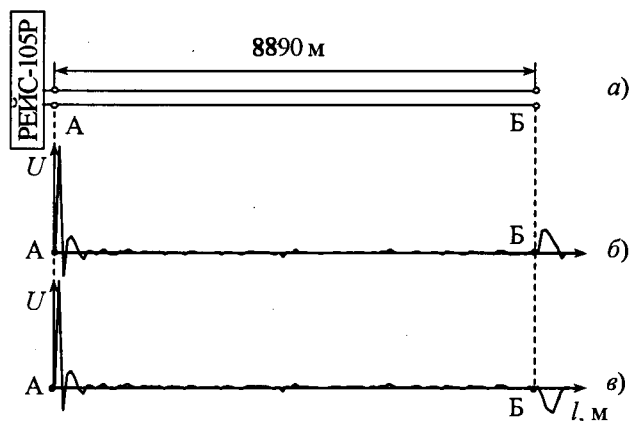


Рис. 4. Результаты зондирования действующей воздушной линии:

*а* – схема линии; *б* – рефлектограмма при обрыве в конце линии; *в* – при КЗ в конце линии

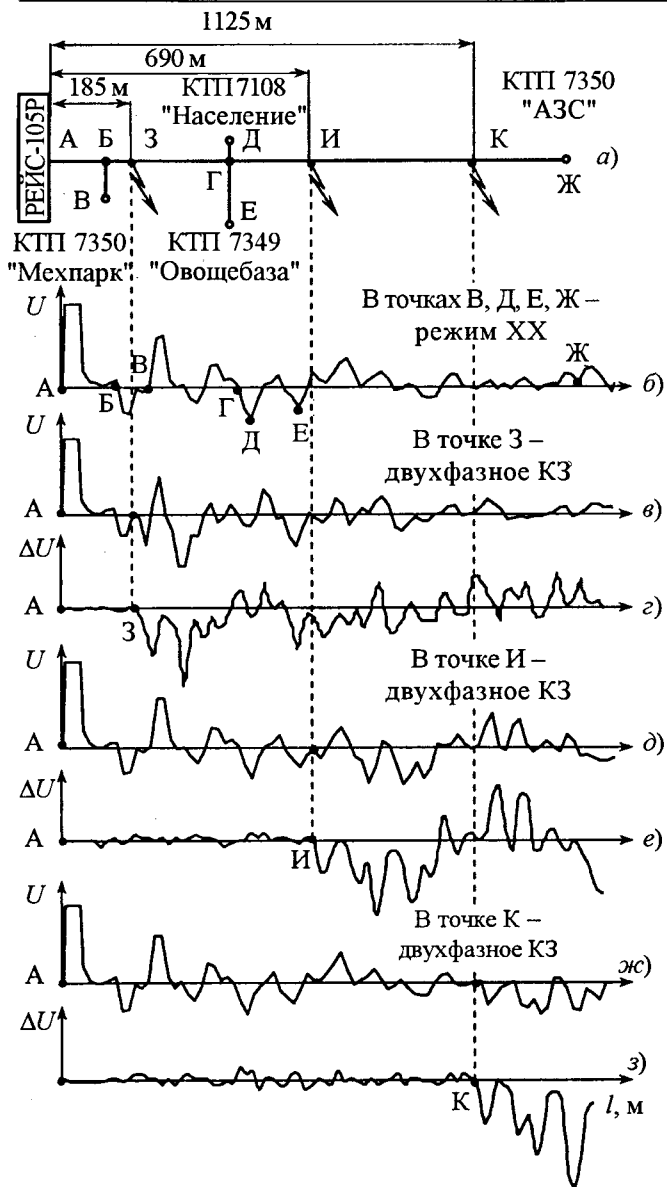


Рис. 5. Определение места двухфазных КЗ разностным способом:

а – схема линии; б – рефлектограмма линии в исходном состоянии; в – рефлектограмма линии при двухфазном КЗ на расстоянии 185 м; г – разность рефлектограмм в и б; д – рефлектограмма линии при двухфазном КЗ на расстоянии 690 м; е – разность рефлектограмм д и б; ж – рефлектограмма линии при двухфазном КЗ на расстоянии 1125 м; з – разность рефлектограмм ж и б

рамм вычесть исходную рефлектограмму  $U(I)$  (рис.5,б), то на разностных рефлектограммах  $\Delta U(I)$  (рис.5,г,е,з) места замыканий чётко выделяются по моменту начала первого всплеска отрицательной полярности флукутирующего сигнала большой амплитуды. Места замыкания обозначены точками 3, И, К. Их местоположения на рефлектограммах совпадают с мес-

тами КЗ на воздушной линии электропередачи.

Разностный метод позволяет, как показали опыты, обнаруживать место повреждения линии даже в тех случаях, когда расстояние между неоднородностями линии (длины ответвлений, расстояние между ответвлениями) меньше расстояния, соответствующего разрешающей способности локационного метода (определяется длительностью зондирующего импульса), примерно в 10 раз.

Приведённые способы распознавания рефлектограмм лежат в основе диагностики линий распределительных сетей 6–35 кВ, имеющих древовидную топологию.

Исследования на линиях 110 кВ и выше были выполнены с помощью рефлектометра РЕЙС-205. На высоковольтных ЛЭП обычно имеются устройства высокочастотной обработки в виде высокочастотных заградителей (ВЗ) и фильтры присоединения (Ф). Рефлектометр РЕЙС-205 подключался к линии по схеме "фаза – земля" через высокочастотный кабель (ВК), фильтр присоединения (Ф) и конден-

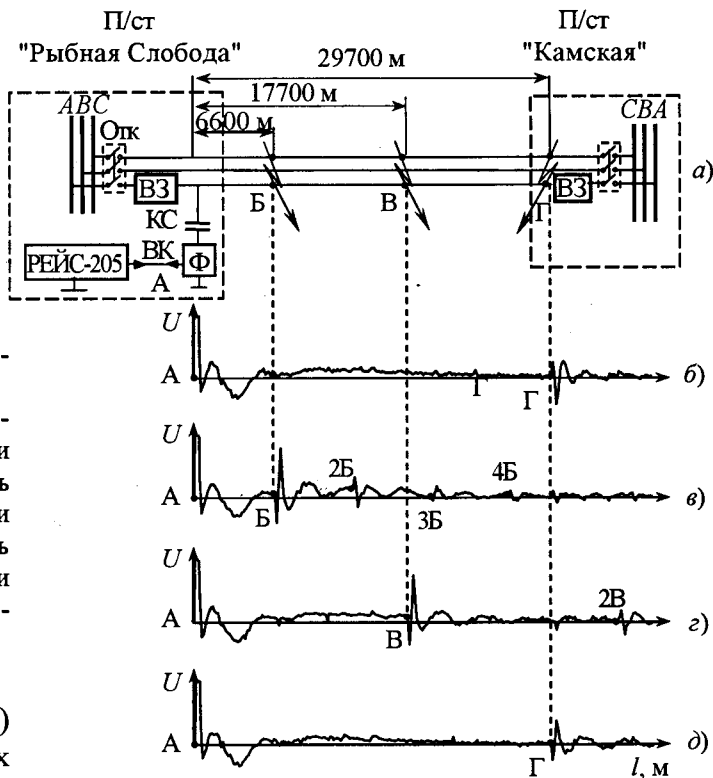


Рис.6. Определение места двухфазных КЗ способом логического анализа на воздушной линии 110 кВ:

а – схема линии; б – рефлектограмма линии в исходном состоянии; в, г, д – рефлектограммы линии при двухфазном КЗ на расстояниях 6600, 17700, 29700 м от начала линии соответственно

сатор связи (КС). Линия могла быть при этом обесточена или находиться под напряжением. Как показали опыты, для выполнения локационных измерений это не имеет принципиального значения.

На рис.6 представлены результаты обнаружения двухфазных КЗ при локационном зондировании импульсами  $\tau = 2$  мкс линии 110 кВ между подстанциями "Рыбная Слобода" и "Камская" длиной 29 700 м. На рис.6,а приведена схема этой линии, рефлектометр был подключён к проводу фазы А.

На исходной рефлектограмме  $U(l)$  (рис.6,б) видны в точке А зондирующий импульс положительной полярности с сопутствующими колебаниями сигнала из-за недостаточности полосы пропускания фильтра присоединения и отражённый от ВЗ на конце линии в точке Г положительный импульс (тоже с колебаниями сигнала), который обнаруживается абсолютно однозначно.

На рефлектограммах  $U(l)$  (рис.6,в,г,д), полученных при двухфазном КЗ линии 110 кВ на расстояниях 6600, 17700, 29700 м от её начала в точках Б, В, Г соответственно, отчётливо видны отрицательные отражённые импульсы с амплитудными флуктуациями, которые свидетельствуют о КЗ проводов на этих расстояниях.

Были выполнены исследования по обнаружению локационным зондированием случаев однофазного замыкания провода на землю (ОЗЗ) на линиях напряжением 6–35 кВ и напряжением 110 кВ и выше. Рассмотрены особенности этого типа повреждений. Исследования выполнялись в лабораторных и полевых условиях, результаты рефлектометрии в обоих случаях полностью совпадают. Разработана методика обнаружения ОЗЗ на базе экспериментов на действующих электролиниях распределительных сетей и магистральных линиях электропередачи.

В качестве примера на рис.7 представлены результаты обнаружения случаев ОЗЗ на линии между подстанциями "Рыбная Слобода" и "Камская" при зондировании импульсом  $\tau = 2$  мкс. На линии на этих же расстояниях 6600 и 17700 м от её начала в точках Б, В были созданы однофазные замыкания провода на землю.

На исходной рефлектограмме (рис.7,б) в точке А виден положительный зондирующий импульс

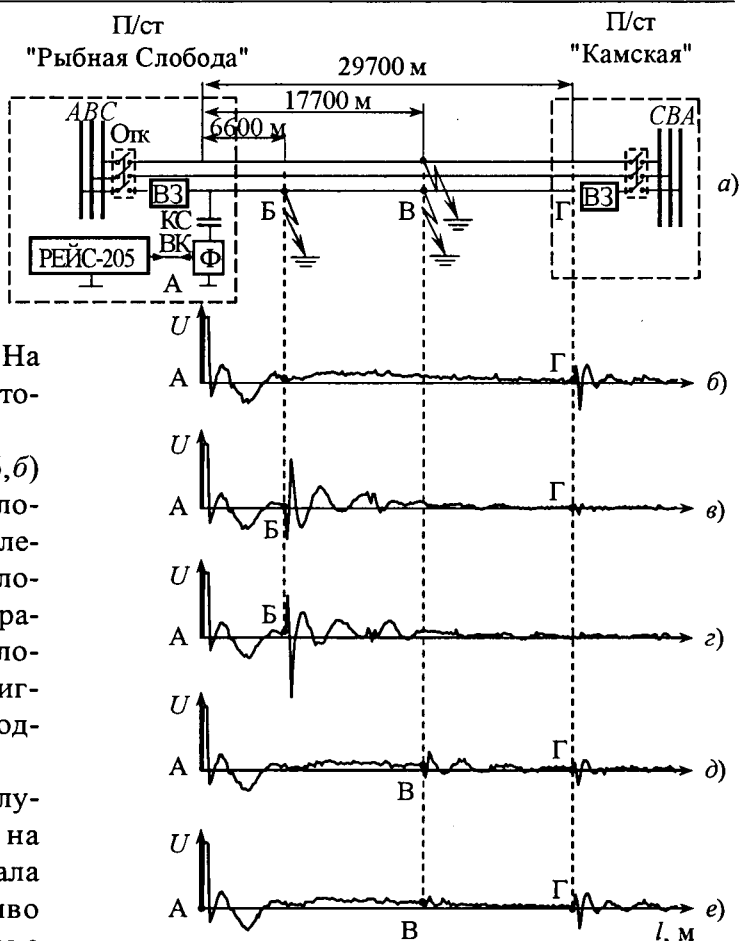


Рис.7. Определение места однофазных замыканий на землю и обрыва фазного провода логическим методом на воздушной линии 110 кВ длиной 29700 м с ВЧ обработкой:

а – схема линии; б – рефлектограмма линии в исходном состоянии; в, г – рефлектограммы линии при ОЗЗ фазы А и обрыва фазного провода соответственно на расстоянии 6600 м от начала линии; д и е – рефлектограммы линии при ООЗ фазы А и ОЗЗ фазы С, соответственно, на расстоянии 17700 м

рефлектометра, а в точке Г – положительный импульс с флуктуациями, отражённый от высокочастотного загрязителя, как и на рис.6,б.

На рефлектограммах рис.7,в,д в точках замыкания Б, В так же, как и на рис.6,в,г, видны отрицательные импульсы, но с меньшей амплитудой. На рефлектограммах рис.7,в,д,е явно виден положительный импульс, отражающийся от конца линии в точке Г. При двухфазном КЗ импульс, отражённый в точке Г, на рис.6,в,г отсутствует. Он отсутствует и на рефлектограмме рис.7,г при обрыве провода фазы А. По этому признаку можно разделять случаи КЗ, обрыва провода и ОЗЗ.

Если зондирование ведётся по одному фазному проводу (фаза *A*), то появление ОЗЗ на другом фазном проводе (фаза *C*) также проявляется в виде отражённого отрицательного импульса, но с меньшей амплитудой, как это видно на рефлектограмме рис. 7, *e* в точке *B*. Таким образом, существует возможность контроля всех проводов ЛЭП при подключении рефлектометра к одному из них.

Цикл экспериментов был посвящён исследованиям по обнаружению неоднородностей электролиний в виде несанкционированных ответвлений, загрязнённых изоляторов, гололёдных образований, кабельных вставок [19, 20]. Установлено, что импульсы, отражённые от этих неоднородностей при локационном зондировании, явно и однозначно распознаются на рефлектограмме и дают возможность измерения расстояния до них (подробнее в последующих публикациях). На способ обнаружения гололёда на проводах электролиний локационным методом получен патент РФ [21].

Была оценена помеховая обстановка на линиях электропередачи, показаны приёмы выделения импульсов локационного зондирования среди помех естественного (коронный разряд, грозовые разряды) и искусственного (сигналы релейной защиты и систем телемеханики, телефонные сообщения) происхождения.

При подготовке к проведению измерений локационным методом на конкретной линии электропередачи необходимо учитывать наличие других линий, расположенных параллельно или рядом с ней, которые могут быть источниками помех. Также необходимо учитывать как источник помех наличие на зондируемой линии высокочастотных каналов технологической связи.

Влияние помех соседнего канала при зондировании выбранной электрической линии рефлектометром РЕЙС-105Р или РЕЙС-205 можно ослабить с помощью заградительных фильтров, настроенных на частоту соседнего мешающего канала. Можно также применить режим накопления сигналов, т.е. усреднить несколько последовательно снятых рефлектограмм. Цифровое накопление сигнала является эффективным методом от-

стройки от асинхронных помех, каковыми для локационного зондирования выступают сигналы технологической информации (сигналы релейной защиты, систем телемеханики и телефонные сообщения). Так как асинхронные помехи носят случайный характер, то после цифрового накопления их уровень значительно снижается и соотношение сигнал/помеха увеличивается.

На рис. 8 приведён пример выделения отражённых импульсов локационного зондирования на фоне помех от сигналов релейной защиты во время измерений на действующей (находящейся под напряжением) воздушной линии 220 кВ длиной 33000 м между подстанциями "Бугульма-500" и "Письмянка" Бугульминских электрических сетей. Схема линии изображена на рис. 8, *a*, зондирующий импульс имел длительность  $\tau = 4,0$  мкс и амплитуду  $U = 22$  В, было усреднено 6 рефлектограмм, измерения велись по фазе *A*.

На рефлектограмме этой линии (рис. 8, *b*) сразу же после зондирующего импульса виден флуктуирующий затухающий сигнал с большими амплитудой и периодом. Это реакция устройств высокочастотной обработки линии на зондирующий импульс рефлектометра РЕЙС-205. Кроме того, на рефлектограмме видны периодические колебания сигнала с небольшими амплитудой и периодом, обусловленными аппаратурой ВЧБ. На их фоне в точке *B* хорошо вы-

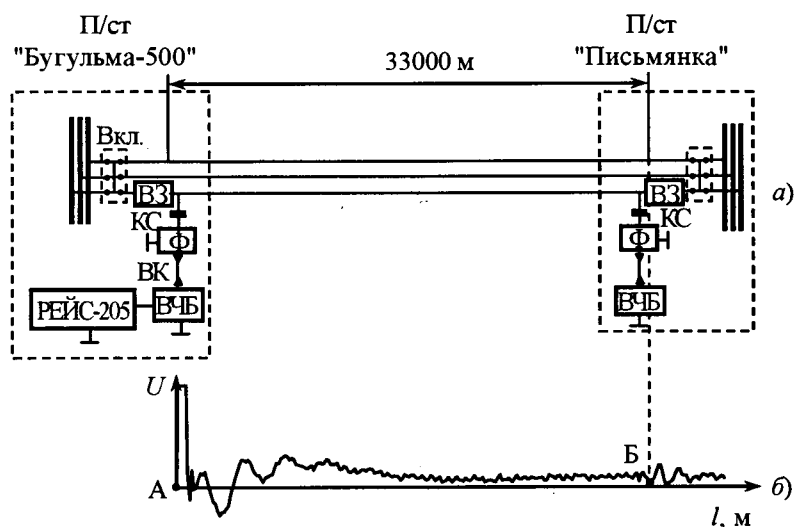


Рис. 8. Выделение импульса, отражённого от конца линии в точке *B*, на фоне периодической помехи на действующей воздушной линии 220 кВ длиной 33000 м:

*a* – схема линии; *b* – рефлектограмма линии с помехой, созданной аппаратурой ВЧБ

деляется отражённый от оконечного высокочастотного заградителя положительный импульс в совокупности с характерными затухающими колебаниями. В данном случае соотношение сигнал/помеха равно 5.

Итогом исследований после регистрации в лабораторных и полевых условиях и анализа более 3000 рефлектограмм является разработка системы диагностики воздушных линий электропередачи локационным методом, в состав которой входят методики зондирования электролиний и методики распознавания зарегистрированных рефлектограмм.

## Выводы

1. Разработаны принципы и алгоритмы обнаружения методом импульсного локационного зондирования повреждений в виде обрывов, КЗ и однофазных замыканий на землю проводов воздушных линий распределительных сетей напряжением 6–35 кВ с древовидной топологией, а также воздушных линий напряжением 110 кВ и выше [22].

2. Показаны возможности обнаружения методом импульсного локационного зондирования неоднородностей воздушных линий электропередачи в виде несанкционированных ответвлений, загрязнённых изоляторов, гололедных образований, кабельных вставок.

3. Метод импульсного локационного зондирования электролиний является автономным, оперативным, дистанционным, универсальным, надёжным, достоверным, относительно дешёвым, не зависит от наличия или отсутствия напряжения на электролинии и не требует специального канала для передачи информации о результатах зондирования диспетчеру.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Приволжских электрических сетей ОАО "Татэнерго" и студентам Казанского государственного энергетического университета Э.И. Лукину, Р.Э. Абдуллазанову, А.Г. Латипову, Г.В. Тарасовой (Лукиной) за помощь при выполнении измерений и их обработке.

*Исследования выполнены на средства фонда НИОКР ОАО "Татэнерго" за 2005–2007 гг., а также фонда НИОКР Республики Татарстан (грант Академии наук Республики Татарстан, проект № 06-6.7-345/2005-2006/Ф).*

## Список литературы

1. Раппопорт А.Н. Основные направления научно-технической политики в области развития единой национальной электрической сети России // Электро. 2004. №5. С.2–5.

2. Дементьев Ю.А., Родионов В.А. О состоянии электротехнического оборудования и ВЛ ОАО "ФСК ЕЭС" и мерах по повышению сетевой надёжности // Сб. докл. конф. ТРАВЭК "Интеграция науки и производства". М.: ВЭИ, 2004.

3. Вариводов В.Н. Высоковольтная электротехника: реальность и перспективы // Электро, Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2003. № 4.

4. Брауде Л.И., Скитальцев В.С., Шкарин Ю.П., Глушко С.И. Существующее состояние и перспективы развития высокочастотной связи по линиям электропередачи // Энергетик. 2004. №5. С.13–15.

5. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. Построение электрических распределительных сетей нового поколения. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2005.

6. Шалыт Г.М. Определение мест повреждений линий электропередачи импульсным методом. М.: Энергия, 1968.

7. Минуллин Р.Г., Закамский Е.В. Определение мест повреждения в электрических сетях напряжением 6–35 кВ импульсным методом // Материалы докладов Российского национального симпозиума по энергетике. Казань: КГЭУ, 2001. Т.2. С.62–64.

8. Минуллин Р.Г., Закамский Е.В., Андреев В.В. Исследования условий отражения импульсных сигналов в распределительных сетях с древовидной топологией // Электротехника. 2003. №10. С.39–44.

9. Минуллин Р.Г., Закамский Е.В. Обнаружение повреждений в электрических распределительных сетях локационным методом. Казань: ООО "ИЦ Энергопрогресс", 2004.

10. Минуллин Р.Г. Методы и аппаратура определения мест повреждений в электросетях. Казань: ИЦ "Энергопрогресс", 2002.

11. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. Диагностика локационным методом состояния электрических кабельных линий при их прожиге // Электротехника. 2006. №6. С. 50–58.

12. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. Физические основы диагностики повреждений воздушных линий распределительных электрических сетей // Изв. вузов. Проблемы энергетике. 2004. №5–6. С.43–47.

13. Фардиев И.Ш., Минуллин Р.Г., Закамский Е.В. и др. Диагностика воздушных линий распределительных электрических сетей // Изв. вузов. Проблемы энергетике. 2004. №7–8. С.41–49.

14. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф., Карпенко О.И. Построение системы корпоративной связи нового поколения по распределительным сетям напряжением 0,4–35 кВ // Изв. вузов. Проблемы энергетике. 2005. №3–4. С.21–41.

15. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф. и др. Локационный мониторинг неоднородностей проводящих структур с древовидной топологией // Доклады XII Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация и связь RLNC". Воронеж: Воронежский ГУ. 2005. С.1189–1200.

16. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф. и др. Использование распространения высокочастотных сигналов по проводящим структурам с древовидной топологией для диагностики их состояния // Доклады XXI Всероссийской научной конференции "Распространение радиоволн". Йошкар-Ола: Марийский ГТУ. 2005. Т.2. С.408–412.

17. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф. и др. Импульсные реакции неоднородностей распределительных электрических сетей при локационном зондировании // Тезисы докладов Международной научно-техни-

ческой конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XII Бенардосовские чтения). Иваново: Ивановский ГЭУ, 2005. С.179–180.

18. Миннуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф., Лукин Э.И. Особенности подключения рефлектометра к линиям электропередачи при локационном зондировании // Электротехника. 2008. №2. С.34–43.

19. Миннуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. и др. Локационный мониторинг неоднородностей распределительных электрических сетей // Электротехника. 2006. № 5. С.2–10.

20. Миннуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Петрушенко Ю.Я. и др. Способ обнаружения появления гололеда на проводах линии электропередачи // Энергетика Татарстана. 2006. №3. С.46–50.

21. Пат. 2402495РФ. Способ обнаружения появления гололеда на проводах линии электропередачи / Р.Г. Миннуллин, И.Ш. Фардиев, Ю.Я. Петрушенко и др. 20.02.2006. Приоритет от 15.04.2005.

22. Фардиев И.Ш. Основные направления технического развития электрических распределительных сетей // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2006. №7–8. С.54–63.

Минуллин Ренат Гизатуллович – профессор кафедры релейной защиты и автоматизации электроэнергети-

ческих систем (РЗАЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Окончил в 1959 г. радиотехнический факультет Казанского авиационного института (КАИ). В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Прогностическая радиофизическая модель среднеширотного спорадического слоя E" в ИЗМИРАН.

Петрушенко Юрий Яковлевич – ректор КГЭУ, заведующий кафедрой механики КГЭУ, профессор. Окончил в 1973 г. самолетостроительный факультет КАИ. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Задачи о собственных колебаниях, устойчивости и нестационарного деформирования предварительно нагруженных статической нагрузкой составных слоистых оболочек сложной геометрии и численные методы их решения" в КАИ.

Фардиев Ильшат Шаехович – заведующий кафедрой РЗАЭС КГЭУ, профессор. Окончил в 1984 г. электро-энергетический факультет МЭИ.

## Математическая модель электромагнитного переходного процесса в электрической сети, содержащей сверхпроводниковый токоограничитель индуктивного типа

МАНУСОВ В.З., МИХЕЕВ П.А.

*Предложена математическая модель электромагнитного переходного процесса в сети при наличии в ней элементов плавно, но быстро изменяющих свою индуктивность, в данном случае сверхпроводниковых ограничителей аварийных токов. Модель позволяет точно оценить воздействие (тепловое и электродинамическое) тока КЗ на элементы электрической сети, что является неотъемлемым требованием при выборе электрооборудования.*

В последние несколько лет на основе значительных достижений в области высокотемпературной сверхпроводимости [1, 2] появляется всё больше применений данного явления в электроэнергетике, в частности сверхпроводниковых токоограничителей (СОТ) для электрических систем [3, 4]. Основной областью перспективного применения СОТ являются высоковольтные электрические сети с номинальным

*The paper presents the mathematical model of the electromagnet transient in power circuit comprising the elements that smoothly but rapidly change their inductance. In this case they are superconducting fault current limiters. The model suggested allows to accurately estimate the influence (thermal and electrodynamic) of short current circuit on the power circuit elements. It is a significant requirement choosing an electrical equipment.*

напряжением до 35 кВ, в том числе и в нейтральных [5].

Наиболее эффективным с точки зрения токоограничивающего эффекта является применение СОТ индуктивного типа. СОТ имеют способность изменять в течение нескольких миллисекунд своё внешнее сопротивление. Электромагнитный процесс в сети с СОТ будет иметь свои особенности, обусловленные

стремительным изменением одного из её пассивных реактивных элементов. Ранее принималось допущение о мгновенном изменении индуктивности СОТ. Необходима математическая модель данного процесса, позволяющая учитывать электрическую инерционность самого СОТ. Применение данной модели в расчётах позволяет оценить тепловое воздействие тока КЗ в сети с СОТ, которое является одним из условий выбора электрических элементов, таких как выключатель, воздушная и кабельная линии (КЛ) электропередачи и др.

**Построение математической модели.** Рассмотрим схему, содержащую СОТ.

По второму закону Кирхгофа

$$E(t) = \frac{d\psi_{\text{СОТ}}(t)}{dt} + \frac{d\psi_{\text{к}}(t)}{dt} + i(t)r_{\text{к}}, \quad (1)$$

где  $\psi_{\text{СОТ}}$  и  $\psi_{\text{к}}$  – потокосцепления СОТ и КЛ соответственно;  $r_{\text{к}}$  – активное сопротивление КЛ.

Потокосцепление кабеля с учётом того, что его индуктивность не зависит от протекающего тока, будет зависеть только от тока:

$$\psi_{\text{к}} = L_{\text{к}}(t)i(t). \quad (2)$$

Потокосцепление СОТ будет зависеть как от изменяющейся индуктивности, так и от тока:

$$\psi_{\text{СОТ}} = L_{\text{СОТ}}(t)i(t). \quad (3)$$

С учётом выражений (2) и (3) на основе (1) получаем дифференциальное уравнение переходного процесса:

$$E(t) = \frac{d[L_{\text{СОТ}}(t)i(t)]}{dt} + \frac{d[L_{\text{к}}(t)i(t)]}{dt} + i(t)r_{\text{к}}. \quad (4)$$

С учётом свойства производной произведения двух функций преобразуем дифференциальное уравнение:

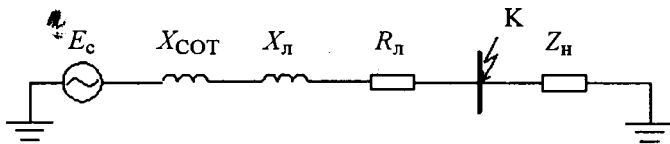


Рис.1. Однолинейная схема для построения математической модели:

$E_c$  – ЭДС источника напряжения;  $X_{\text{СОТ}}$  – индуктивное сопротивление СОТ;  $X_{\text{л}}$  – индуктивное сопротивление КЛ;  $R_{\text{л}}$  – активное сопротивление КЛ;  $Z_{\text{н}}$  – комплексное сопротивление нагрузки потребителя

$$E(t) = \frac{d[L_{\text{СОТ}}(t)]}{dt}i(t) + L_{\text{СОТ}}(t)\frac{d[i(t)]}{dt} + \frac{d[L_{\text{к}}(t)]}{dt}i(t) + \dots + L_{\text{к}}(t)\frac{d[i(t)]}{dt} + i(t)r_{\text{к}}. \quad (5)$$

Исходя из физической природы индуктивности [6], а также в виду того, что индуктивность кабеля не зависит от времени:

$$\frac{d[L_{\text{к}}(t)]}{dt}i(t) = 0.$$

Тогда выражение (5) несколько упрощается:

$$E(t) = \frac{d[L_{\text{СОТ}}(t)]}{dt}i(t) + L_{\text{СОТ}}(t)\frac{d[i(t)]}{dt} + \dots + L_{\text{к}}(t)\frac{d[i(t)]}{dt} + i(t)r_{\text{к}}. \quad (6)$$

Как известно, для того, чтобы нарушить сверхпроводящее состояние необходимо увеличить либо температуру, либо значение воздействующего магнитного поля. В быстродействующих СОТ используется как раз увеличение магнитного поля в момент КЗ в сети.

Ранее при приближённых расчётах было принято полагать, что индуктивность СОТ изменяется мгновенно (без инерции), как это показано на рис.3,а, с помощью применения функции Хевисайда. Однако это не позволяло учитывать влияние СОТ на переходный процесс при токоограничении.

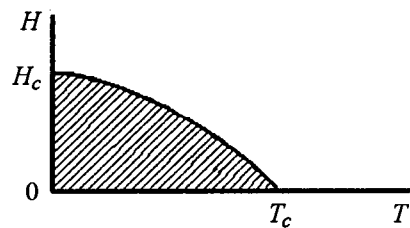


Рис.2. Область существования сверхпроводимости:  $H_c$  – критическая сила магнитного поля;  $T_c$  – критическая температура

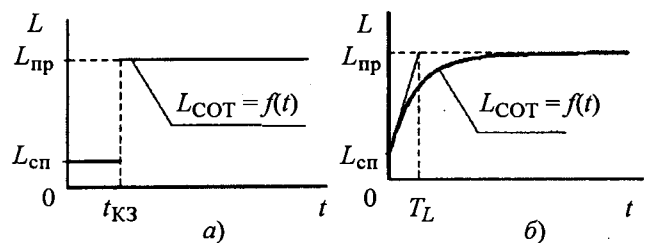


Рис.3. Упрощённое (безынерционное) изменение индуктивности СОТ в момент КЗ (а) и математическая модель изменения индуктивности СОТ при КЗ в сети (б)

Что более важно, подобный подход не допускает математического описания электромагнитного переходного процесса в форме одного аналитического выражения (из-за невозможности дифференцировать скачкообразную функцию), а значит, не позволяет рассчитывать мгновенные значения тока и напряжения, результирующие значения электродинамического и теплового воздействий тока КЗ на электрооборудование, время отключения с помощью выключателя ограниченного СОТ аварийного тока.

В [7–9] приведены различные модели электрических параметров данных устройств. Во всех работах температура сверхпроводящего элемента в момент КЗ начинает плавно и монотонно возрастать по зависимости, близкой к экспоненциальной, с температурой увеличивается и внешнее сопротивление СОТ. Анализ зависимостей внешнего сопротивления СОТ позволяет сделать вывод о целесообразности введения адекватной физическому процессу монотонной, легко интегрируемой и дифференцируемой функции. В качестве такой функции может быть применена экспонента (рис. 3, б). Экспоненциальная функция выбрана как соответствующая физике процесса, а также позволяющая ввести понятие "постоянной времени реагирования" СОТ.

Тогда изменение индуктивности СОТ как функции времени:

$$L_{СОТ}(t) = L_{пр} + (L_{сп} - L_{пр}) e^{-\frac{t}{T_L}}, \quad (7)$$

где  $L_{сп}$  – индуктивность СОТ в сверхпроводящем состоянии;  $L_{пр}$  – индуктивность СОТ в проводящем состоянии;  $T_L$  – постоянная времени реагирования сверхпроводника,

Как следствие, возможное с математической точки зрения применение метода припасовывания для решения задачи отыскания параметров электромагнитного переходного процесса при учёте индуктивности СОТ, изображённой на рис. 3, а, функцией приведёт к погрешности в определении параметров переходного процесса из-за недоучёта физических особенностей изменения индуктивности СОТ. В то же время решение поставленной задачи даже с учётом изображённой на рис. 3, б модели изменения индуктивности СОТ численными методами не является достаточно наглядным с точ-

ки зрения влияния динамики изменения индуктивности СОТ на электромагнитный переходный процесс. Поэтому в качестве окончательной модели, описывающей изменение индуктивности СОТ, принимается экспоненциальная модель, а отыскание составляющих переходного процесса будет производиться решением дифференциального уравнения.

С учётом выражения (7) дифференциальное уравнение переходного процесса приобретает вид:

$$E(t) = \frac{d \left[ L_{пр} + (L_{сп} - L_{пр}) e^{-\frac{t}{T_L}} \right]}{dt} i(t) + \dots + \left[ L_{пр} + (L_{сп} - L_{пр}) e^{-\frac{t}{T_L}} \right] \frac{d[i(t)]}{dt} + L_k \frac{d[i(t)]}{dt} + i(t)r_k. \quad (8)$$

Учитывая подобные слагаемые относительно тока и его производной, получаем:

$$E(t) = \left[ L_k + L_{пр} + (L_{сп} - L_{пр}) e^{-\frac{t}{T_L}} \right] \frac{d[i(t)]}{dt} - \left[ \frac{(L_{сп} - L_{пр}) e^{-\frac{t}{T_L}}}{T_L} - r_k \right] i(t). \quad (9)$$

**Решение дифференциального уравнения электромагнитного переходного процесса.**

Уравнение (10) является неоднородным линейным дифференциальным уравнением. В общем случае неоднородное линейное дифференциальное уравнение может быть записано в виде:

$$\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x). \quad (10)$$

Решение такого уравнения находится в виде [10]:

$$y = e^{-\int P(x)dx} \left[ \int Q(x)e^{-\int P(x)dx} dx + C \right]. \quad (11)$$

Преобразуем уравнение (9) к виду уравнения (11):

$$\frac{d[i(t)]}{dt} + \frac{\left[ r_k - \frac{(L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}}}{T_L} \right]}{\left[ L_k + L_{\text{нр}} + (L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} i(t) = \frac{E(t)}{\left[ L_k + L_{\text{нр}} + (L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \quad (12)$$

Таким образом, в общем случае неоднородное дифференциальное уравнение (11) при замене  $y$  на  $i$  и  $x$  на  $t$  будет иметь вид:

$$P(t) = \frac{\left[ r_k - \frac{(L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}}}{T_L} \right]}{\left[ L_k + L_{\text{нр}} + (L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \quad (13)$$

$$Q(t) = \frac{E(t)}{\left[ L_k + L_{\text{нр}} + (L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \quad (14)$$

По [10] интеграл такого вида

$$\int \frac{dx}{a + be^{px}} = \frac{t}{a} - \frac{1}{ap} \ln |a + be^{px}| \quad (15)$$

Тогда

$$\int \frac{1}{T_L + \frac{T_L(L_k + L_{\text{нр}})}{(L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})} e^{-\frac{t}{T_L}}} dt = \frac{t}{T_L} - \frac{1}{T_L} \frac{1}{T_L} \ln \left[ T_L + \frac{T_L(L_k + L_{\text{нр}})}{(L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})} e^{-\frac{t}{T_L}} \right] + C = \frac{t}{T_L} - \ln \left[ T_L + \frac{T_L(L_k + L_{\text{нр}})}{(L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})} e^{-\frac{t}{T_L}} \right] + C \quad (16)$$

Обозначая в (15)

$$a = L_k + L_{\text{нр}}; b = (L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}}); p = -1/T_L,$$

получаем:

$$\int \left( \frac{1}{L_k + L_{\text{нр}} + (L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}}} \right) dt = \frac{t}{L_k + L_{\text{нр}}} - \dots - \frac{t}{(L_k + L_{\text{нр}}) \frac{(-1)}{T_L}} \ln \left[ L_k + L_{\text{нр}} + (L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}} \right] + C = \frac{t}{L_k + L_{\text{нр}}} + \frac{T_L}{L_k + L_{\text{нр}}} \times \ln \left[ L_k + L_{\text{нр}} + (L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}} \right] + C \quad (17)$$

Сгруппировав все константы в одну, находим выражение для свободной составляющей тока замыкания:

$$\int P(x)dx = \left[ \frac{t}{T_L} - \ln \left[ T_L + \frac{T_L(L_k + L_{\text{нр}})}{(L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})} e^{-\frac{t}{T_L}} \right] - \dots - \frac{r_k t}{L_k + L_{\text{нр}}} - \frac{r_k T_L}{(L_k + L_{\text{нр}})} \times \ln \left[ L_k + L_{\text{нр}} + (L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}} \right] + C \right] \quad (18)$$

В итоге решение уравнения электромагнитного переходного процесса будет иметь вид:

$$i(t) = e \left[ \frac{t}{T_L} - \ln \left[ T_L + \frac{T_L(L_k + L_{\text{нр}})}{(L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})} e^{-\frac{t}{T_L}} \right] - \dots - \frac{r_k t}{L_k + L_{\text{нр}}} - \frac{r_k T_L}{L_k + L_{\text{нр}}} \ln \left[ L_k + L_{\text{нр}} + (L_{\text{сн}} - L_{\text{нр}})e^{-\frac{t}{T_L}} \right] \right] \times$$

$$\times \int \frac{E(t)}{\left[ L_{\kappa} + L_{\text{пр}} + (L_{\text{сп}} - L_{\text{пр}}) e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} e^{\left[ \frac{t}{T_L} - \ln \left[ T_L + \frac{T_L(L_{\kappa} + L_{\text{пр}})}{(L_{\text{сп}} - L_{\text{пр}})} e^{-\frac{t}{T_L}} \right] - \dots \right]} \dots \frac{r_{\kappa} t}{L_{\text{я}} + L_{\text{япр}}} \frac{r_{\kappa} T_L}{(L_{\kappa} + L_{\text{пр}})} \ln \left[ L_{\kappa} + L_{\text{пр}} + (L_{\text{сп}} - L_{\text{пр}}) e^{-\frac{t}{T_L}} \right] dx + C, \tag{19}$$

где  $\times$  – оператор математического умножения.

Если в выражении (19) заменить неопределённое интегрирование интегрированием в пределах от 0 до  $t$ , то получится решение, равное  $C$  при  $t = 0$  [10]. Уравнение легче решается численными методами.

**Пример.**

Для схемы рис. 1 заданы параметры схемы замещения:

- источник  $U_{\text{ном}} = 10$  кВ;
- кабельная линия
- $L_{\text{кл}} = 0,1$  Гн;  $R_{\text{кл}} = 1$  Ом;
- сверхпроводниковый ограничитель

$L_{\text{сп}} = 0$ ,  $L_{\text{пр}} = 0,5$  Гн; рассматривается случай для постоянных времени реагирования СОР  $T_{L1} = 2$  мс,  $T_{L2} = 10$  мс,  $T_{L3} = 20$  мс.

Режим: предшествующий режим – холостой ход, в момент  $t = 0$  в сети происходит трёхфазное КЗ.

1. Определим составляющие тока замыкания в ходе переходного процесса по построенной математической модели.

Все расчёты проводим в соответствии с моделью по программе математических расчётов Matsoft MathCAD [11]. Результаты расчётов иллюстрируем с помощью графических зависимостей для каждой постоянной времени СОР в отдельности.

Полученная модель не претендует на абсолютную объективность, хотя и построена в строгом соответствии с законами электротехники и математическими выражениями.

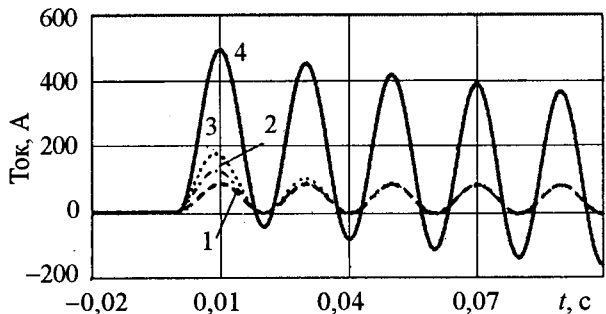
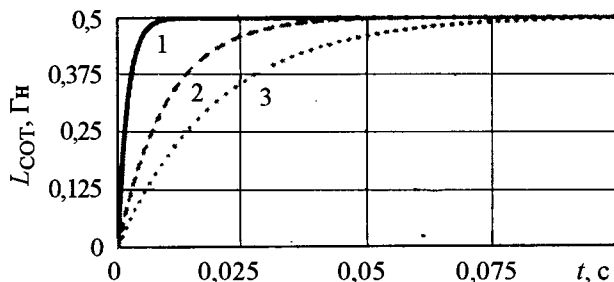


Рис. 4. Изменение индуктивности СОР в текстовой задаче при различных постоянных времени  $T_L$  (а) и результирующий ток в цепи с токоограничением с помощью СОР и без него при различных  $T_L$  (б):

1 – 3 – с СОР; 1 –  $T_L = 2$  мс; 2 –  $T_L = 10$  мс; 3 –  $T_L = 20$  мс; 4 – без СОР

В случае иных исходных условий переходного процесса (фазы начала КЗ, учёта тока в цепи до начала переходного процесса) необходимо учесть граничные условия для времени  $t = 0$  с целью выполнения закона коммутации.

**Тепловое воздействие тока короткого замыкания в сети с СОТ.** Для проверки оборудования (в частности ВВ и КЛ) необходимо оценить тепловое воздействие тока КЗ: определить действующее значение и тепловой импульс тока КЗ в сети с СОТ.

Рассмотрим, чем будет определяться тепловое воздействие тока КЗ при наличии в сети СОТ.

В общем виде действующее значение тока

$$I(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i(t)^2 dt}, \quad (20)$$

где  $T$  – период тока промышленной частоты,

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{n} \quad (21)$$

( $\omega$  – угловая скорость тока промышленной частоты;  $n$  – частота тока промышленной частоты);  $i(t)$  – мгновенное значение тока КЗ.

Тепловой импульс тока КЗ функции времени

$$B_k(t) = \int_0^t [(I(t))^2] dt. \quad (22)$$

Используя выражение (20), получаем:

$$B_k(t) = \int_0^t \left[ \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i(t)^2 dt \right] dt. \quad (23)$$

В итоге тепловой импульс тока КЗ при наличии СОТ будет определяться выражением:

$$B_k(t) = \int_0^t \left[ \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} \left[ e^{-\int P(t) dt} \int [Q(t) e^{-\int P(t) dt} dt] \right]^2 dt \right] dt. \quad (24)$$

Если в выражении (24) заменить неопределённое интегрирование интегрированием в пределах от 0 до  $t$ , то получим решение, принимающее значение  $C$  при  $t = 0$  [10].

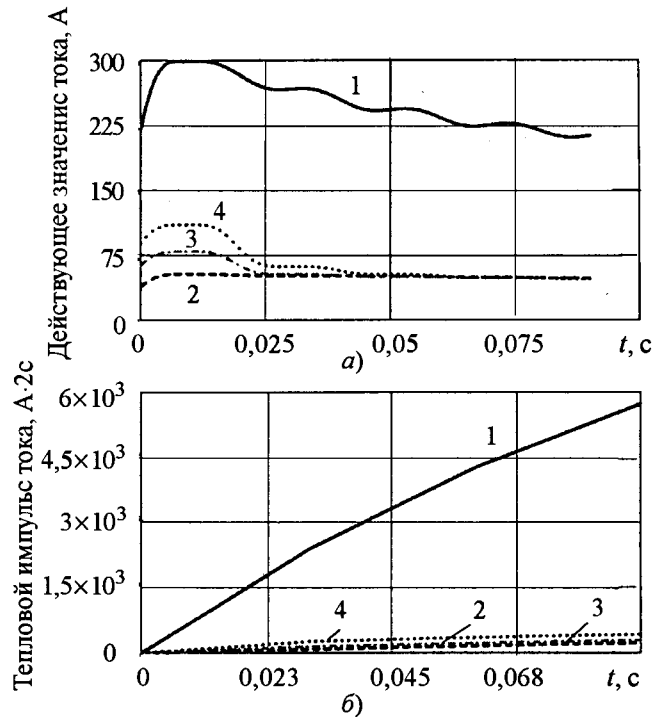


Рис. 5. Действующее значение тока КЗ (а) и тепловой импульс тока КЗ (б):

1 – без СОТ; 2 – СОТ с  $T_L = 2$  мс; 3 – СОТ с  $T_L = 10$  мс; 4 – СОТ с  $T_L = 20$  мс

Построим зависимость действующего значения тока КЗ и теплового импульса от времени, для параметров схемы замещения, указанных в приведённом примере.

Все расчёты проводим в соответствии с моделью по программе математических расчётов Matsoft MathCAD [11]. Результаты расчётов иллюстрируем с помощью графических зависимостей для каждой постоянной времени СОТ в отдельности (рис. 5).

**Выводы**

1. На основании предложенной модели можно более точно по сравнению с допущением о мгновенном изменении индуктивности сверхпроводникового токоограничителя оценить время отключения выключателем тока КЗ.
2. Приведённая математическая модель электромагнитного переходного процесса для сверхпроводникового ограничителя тока КЗ учитывает такой параметр устройства, как скорость нарастания (инерционность) индуктивного сопротивления по отношению к внешней сети при переходе из сверхпроводящего

состояния в естественное проводящее. Одновременно с этим модель учитывает и другие параметры – начальное и конечное значения индуктивности сверхпроводникового токоограничителя до начала и после окончания электромагнитного переходного процесса соответственно.

3. Выведено аналитическое выражение для значения теплового действия тока КЗ при наличии в сети сверхпроводникового токоограничителя с произвольными параметрами. Для начальных условий электромагнитного переходного процесса, когда известно мгновенное значение предшествующего тока, необходимо учесть граничные условия выполнения закона коммутации для времени КЗ, имея в виду, что поток в индуктивности не может измениться мгновенно.

4. Рассмотрено применение модели для оценки электромагнитного и теплового воздействий тока КЗ, используемой для корректного выбора параметров силового энергетического оборудования (кабель, трансформатор, выключатель, генератор).

#### Список литературы

1. Фишер Л.М., Волошин И.Ф. Успехи применения высокотемпературных сверхпроводников в электроэнергетике // Электричество. 2006. №9.
2. Высоцкий В.С., Сытников В.Е., Илюшин К.Е. и др. Сверхпроводимость в электромеханике и электроэнергетике // Электричество. 2005. №7.
3. Алексеев М.П., Кейлин В.Е., Микляев С.А. и др. Сверхпроводниковый ограничитель тока короткого замыкания // Электричество. 2003. №9.
4. Буев А.Р., Лоскутов А.В., Манусов В.З. Сверхпроводящий ограничитель аварийных токов с составным эк-

раном. Результаты экспериментов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2003. №3.

5. Манусов В.З., Михеев П.А. К вопросу о применимости сверхпроводниковых токоограничителей в нейтральных электрических сетях 6–35 кВ // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2007. №5.

6. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. Физические основы электротехники и теория цепей постоянного тока. М.-Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1954.

7. Глускин И.З., Дмитриева Г.А., Мисриханов М.Ш. и др. Сверхпроводниковые токоограничивающие устройства и индуктивные накопители энергии для электроэнергетических систем. М: Энергоатомиздат, 2002.

8. Stemmler M., Steurer M., McLaren P.G. Transient studies of Fault Current Limiters in ship power systems with PSCAD // Flux Magazine. 2005. №9. P.12–14.

9. Weller R.A., Campbell A.M., Coombs T.A., Cardwell D.A., Storey R.J. Computer Modelling of Superconducting Film Type Fault Current Limiters. – IEEE transactions on applied superconductivity, 1999, Vol.9, No.2 Ptl, P.1377–1380.

10. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1981.

11. Дьяконов В.П. MathCAD 8 – 12 для всех. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.

**Манусов Вадим Зиновьевич** – профессор кафедры "Системы электроснабжения" НГТУ. В 1963 г. окончил Новосибирский электротехнический институт (НЭТИ, ныне НГТУ) по специальности "Электрические системы и сети". В 1985 г. в НЭТИ защитил докторскую диссертацию по теме "Нелинейные стохастические модели анализа и планирования режимов электрических систем".

**Михеев Павел Александрович** – аспирант кафедры "Системы электроснабжения" НГТУ, ведущий специалист ОАО "Сибирьэнерго". В 2004 г. окончил Новосибирский ГТУ по специальности "Электроснабжение".

## Формирование траектории движения промышленного робота на базе искусственной нейронной сети

МАХМУД БАССАМ., САФОНОВ Ю.М.

*Рассмотрено применение нейронно-сетевых подходов для решения задачи оптимизации траектории движения промышленного робота по минимуму расхода энергии и быстродействию. Приведены результаты исследования предложенного метода для промышленного робота.*

Задача промышленного робота (ПР) заключается в перемещении схвата из начальной точки в заданную точку рабочей зоны пространства. ПР может выполнять эту задачу перемещением схвата по различным траекториям с учётом известных ограничений по моменту, скорости и конструктивным параметрам ПР.

Многие промышленные роботы питаются от автономных источников питания например, аккумуляторных батарей. В связи с ограниченностью ресурсов таких источников питания требуется при их применении решать задачу экономии расхода потребляемой энергии.

Одним из способов экономии энергии является выбор оптимальной траектории движения схвата ПР, перемещение по которой обеспечивает минимальный расход энергии. Такая возможность обосновывается известным положением, что потери энергии в переходных процессах пропорциональны моменту инерции, который в ПР изменяется в зависимости от траектории движения по разным законам. Возникающие при сложном движении кориолисовы моменты и центробежные силы искажают нагрузочные диаграммы двигателей, увеличивая среднеквадратичные моменты и соответственно потери энергии.

В качестве примера рассмотрим ПР, работающий в цилиндрической системе координат и состоящий из двух звеньев: поворота и линейного перемещения. Задачу перемещения схвата из точки  $A$  в точку  $B$  можно выполнить по различным траекториям, например 1, 2, 3 и 4,

*The use of neural network approach to the solution of the optimization of industrial robot trajectory for a minimum expenditure of power and speed is offered. The results of a study of this method for the industrial robot are given.*

показанным на рис.1. Траектория 1 предполагает вначале выдвигание руки ПР, а затем её поворот. Траектории 2 и 3 получаются при одновременном движении по обеим координатам, но с различными соотношениями скоростей. Траектория 4 предполагает вначале поворот, а затем выдвигание руки ПР.

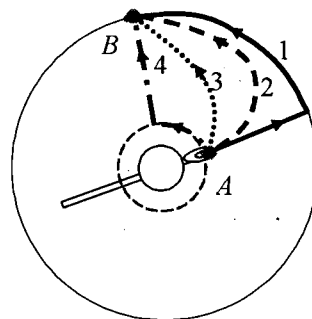


Рис.1. Возможные траектории перемещения схвата из точки  $A$  в точку  $B$

Уравнения движения двухзвенного ПР, работающего в цилиндрической системе координат при допущении, что вся масса руки сосредоточена в схвате, записываются в виде [1]:

$$(J + mr^2) \frac{d\omega}{dt} + 2mvr\omega + M_c = M_1; \quad (1)$$

$$m \frac{dv}{dt} - m\omega^2 r + F_c = F_2, \quad (2)$$

где  $M_1$  – момент двигателя звена поворота;  $F_2$  – сила двигателя звена линейного перемещения;  $J$  – момент инерции звена поворота;  $m$  – масса руки с грузом;  $r$  – линейное перемещение;

$\omega$  – угловая скорость звена поворота;  $v$  – линейная скорость звена перемещения;  $M_c$  – момент статической нагрузки звена поворота;  $F_c$  – статическая сила звена перемещения.

При постоянстве напряжения источника питания и пропорциональности момента двигателя силе тока в качестве критерия, характеризующего потребление энергии, принят

$$q_1 = \int_0^{t_u} \sum i_1 dt = \int_0^{t_u} i_1 dt + \int_0^{t_u} i_2 dt,$$

где  $i_1 = M_1/c_1$ ;  $i_2 = F_2\rho/c_2$ ;  $i_1, i_2$  – токи якорей двигателей поворота и выдвижения соответственно;  $\rho$  – радиус приведения звена выдвижения;  $c_1, c_2$  – коэффициенты пропорциональности.

В качестве критерия, характеризующего быстродействие, принято время отработки перемещения  $q_2 = t_u$ . Результаты расчётов критериев оптимальности при различных траекториях перемещения схвата из точки  $A$  в точку  $B$ , полученные в относительных единицах

$$\left( q_{1*} = \frac{q_1}{q_{1\max}}, \quad q_{2*} = \frac{q_2}{q_{2\min}} \right), \text{ приведены на рис.2.}$$

Анализ приведённых графиков показывает, что для получения траектории движения, оптимальной по минимуму потребляемой энергии, необходимо выполнять поворот с минимальным моментом инерции, а для получения траектории, оптимальной по быстродействию, необходимо включать все приводы одновременно и на максимальные скорости. Выбор оптимальной траектории по двум критериям одновременно представляет собой противоречивую задачу, поэтому оптимизация требует выбора компромиссного решения. Одним из возможных путей решения подобной задачи является балльно-

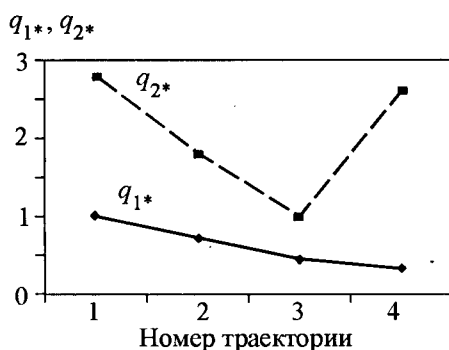


Рис.2. Зависимость критериев оптимальности от траектории

индексный метод. Комплексный показатель определяется как сумма критериев оптимальности со своими весовыми коэффициентами:

$$q = k_1 q_{1*} + k_2 q_{2*} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $k_1, k_2$  – весовые коэффициенты,  $k_1 + k_2 = 1$ .

Весовые коэффициенты выбираются исходя из важности данного критерия для потребителя в данный момент.

После определения оптимальной траектории, нужно решить задачу управления ПР. Для этого применяется нейронно-сетевой подход [2]. Использована трёхслойная нейронная сеть (НС) с обратным распространением ошибки. Полученные оптимальные траектории используются для её обучения. После обучения и тестирования на контрольном множестве НС готова к работе. В процессе работы на вход НС подаются заданные значения координат позиционирования схвата ( $x_i, y_i, z_i$ ), а также приоритеты планируемой траектории движения ( $k_1$  и  $k_2$ ), выход НС формирует оптимальные тахограммы движения ПР  $\omega_{\text{зад}}(t)$  и  $v_{\text{зад}}(t)$ . Рис.3 иллюстрирует результаты моделирования при перемещении схвата из точки  $A$  с координатами  $(0,5, 0, z_0)$  в точку  $B$  с координатами  $(0, 0,5, z_0)$ . Это соответствует повороту ПР на угол  $\pi/2$  рад и выдвижению схвата на расстояние 0,5 м. Сплошная линия показывает рассчитанную оптимальную траекторию движения, а пунктирная линия – траекторию движения, определённую с помощью обученной НС. Расхождение между этими траекториями не превышает 5%.

При экспериментальном исследовании предложенного метода на промышленном роботе ТУР-10 снимались осциллограммы потребляемого тока при отработке перемещений по траекториям движения 1 и 4. Расчёт критериев оптимальности дал следующие результаты:

– при перемещении схвата из точки  $A$  в точку  $B$  по траектории движения 4

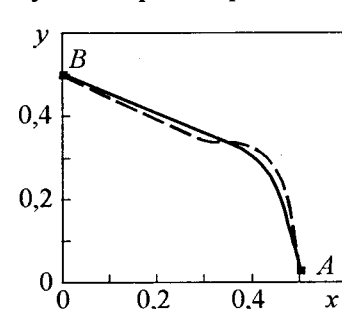


Рис.3. Результаты моделирования при перемещении из точки  $A$  в точку  $B$

$$q_1 = 17,8 \text{ А}\cdot\text{с}, \quad q_2 = 26,4 \text{ с};$$

– при перемещении схвата из точки  $A$  в точку  $B$  по траектории движения 1

$$q_1 = 12,8 \text{ А}\cdot\text{с}, \quad q_2 = 24,4 \text{ с}.$$

Реальная экономия потребляемой

энергии только от оптимального выбора траектории движения может составлять до 28% и при этом иметь выигрыш в быстродействии примерно 7,6%.

Результаты экспериментов показывают, что предложенный метод по выбору оптимальной траектории движения позволяет минимизировать расход энергии, повысить быстродействие, и соответственно увеличить объём работы, которую может ПР совершить при питании от источника питания с ограниченным ресурсом.

#### Список литературы

1. Сафонов Ю.М. Электроприводы промышленных роботов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс. М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2006.

**Махмуд Бассам Юнес** – аспирант кафедры автоматизированного электропривода МЭИ (ТУ), магистр электротехнологии.

**Сафонов Юрий Михайлович** – доцент кафедры автоматизированного электропривода МЭИ (ТУ), канд. техн. наук.

---

## КОНДЕНСАТОРЫ СИЛОВЫЕ

---

### **Исследование влияния повышенных температур и давления на электрическую прочность полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом<sup>1</sup>**

**ГУНЬКО В.И., ОНИЩЕНКО Л.И., ГРЕБЕННИКОВ И.Ю.,**

**ДМИТРИШИН А.Я., ТОПОРОВ С.О.**

*Приведены результаты исследований влияния повышенных температур и давления на электрическую прочность полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом. Данные исследований могут быть применены при разработке электротехнических устройств, в частности высоковольтных импульсных конденсаторов.*

Высоковольтные импульсные конденсаторы являются энергетической основой электроразрядных технологических устройств и в основном определяют надёжность их эксплуатации. В ИИПТ НАН Украины создаются высоковольт-

*In the article are adduced the outcomes of researches of influencing of heightened temperatures and pressure on electric strength of polymethylsiloxane liquid PMS-20 and castor oil, saturated by elegas (SF<sub>6</sub>). The data of researches can be applied at designs of electrotechnical devices, in particular of high-voltage pulse capacitors.*

тные импульсные конденсаторы для погружных электроразрядных комплексов интенсификации добычи нефти, эксплуатирующихся при температуре окружающей среды до 100°C [1]. В конструкции этих конденсаторов для компенсации температурного изменения объёма жидкого диэлектрика используется элегаз, как сжимаемое вещество [2, 3]. При эксплуатации кон-

<sup>1</sup> Печатается в порядке обсуждения.

денсатора при повышенных температурах (до  $100^{\circ}\text{C}$ ) внутри корпуса конденсатора создаётся избыточное давление и происходит насыщение жидкого диэлектрика газом. Вместе с тем, жидкий диэлектрик, насыщенный газом, является одним из основных компонентов диэлектрической системы твёрдый многослойный диэлектрик – пропитывающая жидкость высоковольтного импульсного конденсатора, долговечность которой в большей мере зависит от электрической прочности жидкости, как наиболее электрически слабого компонента диэлектрической системы.

В литературе отсутствуют сведения о влиянии повышенных температур и давления на электрическую прочность диэлектрической жидкости, насыщенной электрически прочным газом.

Цель данной работы – исследование влияния повышенных температур и давления на электрическую прочность полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом, применяемых в качестве жидких диэлектриков высоковольтных импульсных конденсаторов.

Перед проведением исследований полиметилсилоксановая жидкость ПМС-20 и касторовое масло были очищены и стабилизированы, высушены и дегазированы по соответствующим технологиям. После этого, в соответствии с ГОСТ 6581-75 были измерены относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , тангенс угла потерь  $\text{tg}\delta$ , удельное объёмное электрическое сопротивление  $\rho_v$  и электрическая прочность  $E_{\text{пр}}$  жидкостей (табл. 1).

При проведении исследований жидкостями заполнялись испытательные камеры с учётом их коэффициентов объёмного расширения, а свободное пространство камер заполнялось элегазом без избыточного давления при температуре окружающей среды (в нашем случае

$15^{\circ}\text{C}$ ) и по истечении 24 ч производилось определение электрической прочности, причём расстояние между электродами разрядников в испытательных камерах было равным  $1 \pm 0,05$  мм.

На втором этапе исследований жидкости в камерах прогревались при температуре  $80^{+5^{\circ}\text{C}}$  в течение 4 ч, снималось показание манометров, установленных на испытательных камерах и производилось определение электрической прочности.

На третьем этапе исследований определялись давление в испытательных камерах и электрическая прочность жидкостей при их нагреве до  $100^{+5^{\circ}\text{C}}$ .

Аналогично измерялись давление и электрическая прочность полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла в испытательных камерах при заполнении их элегазом с избыточными давлениями в  $1 \cdot 10^5$ ,  $2 \cdot 10^5$  и  $3 \cdot 10^5$  Па (табл. 2).

По результатам измерений построены кривые зависимости электрической прочности полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом, от температуры и давления (рисунок).

В результате проведённых исследований установлено:

- с ростом температуры до  $100^{\circ}\text{C}$  электрическая прочность полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом, снижается;

- компенсация температурного уменьшения электрической прочности полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом, может быть обеспечена за счёт повышения давления газа.

При  $100^{\circ}\text{C}$  с повышением давления газа до  $3 \cdot 10^5$  Па электрическая прочность жидкостей возрастает:

- полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 – в 1,65 раза;

- касторового масла – в 1,85 раза.

Таблица 1

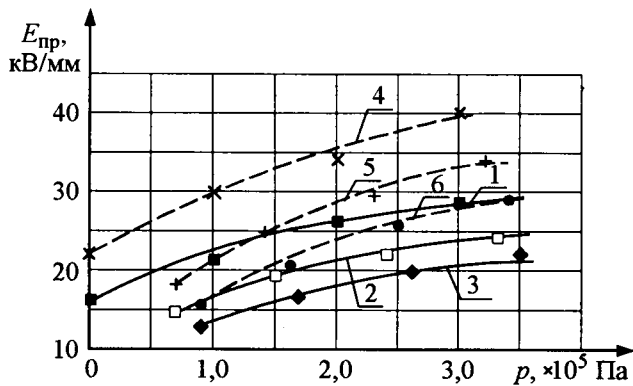
**Характеристики полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла после очистки и стабилизации**

Жидкий диэлектрик	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$\rho_v$ , Ом·см	$E_{\text{пр}}$ , кВ/мм
Полиметилсилоксановая жидкость ПМС-20	2,65	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{12}$	17,5
Касторовое масло	4,51	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,95 \cdot 10^{11}$	26,5

Таблица 2

Электрическая прочность полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом, при различных температурах и давлении газа

Жидкий диэлектрик	15°C		80°C		100°C	
	Избыточное давление, Па	$E_{пр.ср}$ , кВ/мм	Избыточное давление, Па	$E_{пр.ср}$ , кВ/мм	Избыточное давление, Па	$E_{пр.ср}$ , кВ/мм
Полиметил- силоксановая жидкость ПМС-20	0	16,3	$0,7 \cdot 10^5$	14,7	$0,9 \cdot 10^5$	13,4
	$1 \cdot 10^5$	21,2	$1,5 \cdot 10^5$	19,1	$1,7 \cdot 10^5$	17,4
	$2 \cdot 10^5$	26,6	$2,4 \cdot 10^5$	22,0	$2,6 \cdot 10^5$	20,0
	$3 \cdot 10^5$	27,0	$3,3 \cdot 10^5$	24,2	$3,5 \cdot 10^5$	22,1
Касторовое масло	0	22,1	$0,7 \cdot 10^5$	18,5	$0,9 \cdot 10^5$	15,8
	$1 \cdot 10^5$	29,9	$1,4 \cdot 10^5$	25,1	$1,6 \cdot 10^5$	20,6
	$2 \cdot 10^5$	34,3	$2,3 \cdot 10^5$	29,8	$2,5 \cdot 10^5$	26,1
	$3 \cdot 10^5$	40,2	$3,2 \cdot 10^5$	34,3	$3,4 \cdot 10^5$	29,3



Зависимость электрической прочности жидкостей, насыщенных элегазом, от давления при различных температурах:

1–3 – полиметилсилоксановая жидкость ПМС-20 при температурах 15, 80 и 100°C соответственно; 4–6 – касторовое масло при температурах 15, 80 и 100°C соответственно

#### Список литературы

1. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., и др. Оценка достигнутого уровня и перспективы создания высоковольтных импульсных конденсаторов для погружных электроразрядных комплексов // Электротехника. 2007. №8. С.48–51.

2. Пат. 21508А Украина, Н01G6 4/20. Способ изготовления конденсаторов / А.К. Ткаченко, В.И. Гунько, И.Ю. Гребенников // Промислова власність. 1998. №2.

3. Пат. 31446А Украина, Н01G6 2/04. Высоковольтный импульсный конденсатор / Л.И. Онищенко, И.Ю. Гребенников, В.И. Гунько и др. // Промислова власність. 2000. №7-II.

Гунько Виктор Иванович – заведующий сектором Института импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины. Окончил Бельский государственный педагогический институт в 1982 г.

Онищенко Лидия Ивановна – заведующая отделом ИИПТ НАН Украины. Окончила Харьковский политехнический институт в 1972 г.

Гребенников Игорь Юрьевич – ведущий инженер-конструктор ИИПТ НАН Украины. Окончил Николаевский кораблестроительный институт в 1984 г.

Дмитришин Алексей Ярославович – младший научный сотрудник ИИПТ НАН Украины. Окончил Украинский государственный морской технический университет в 2002 г.

Топоров Сергей Олегович – инженер I кат. ИИПТ НАН Украины. Окончил Украинский государственный морской технический университет в 1994 г.

## О влиянии параметров массивного ферромагнитного тела на характеристики его магнитного поля

ПРИДУБКОВ П.Я.

*Проведено исследование параметров магнитного поля ферромагнитного тела. Показано, что в условиях магнитоэлектростатики магнитное поле можно получить только при наличии намагниченной среды, причём вектор напряжённости магнитного поля может быть определён как градиент скалярного магнитного потенциала. Выведено с помощью теоремы Гаусса–Остроградского и формул векторного анализа выражение, описывающее зависимость напряжённости магнитного поля намагниченного тела от его геометрических параметров и намагниченности.*

Магнитные свойства вещественных сред, материалов, тел нередко используются для решения многих производственных задач тех или иных отраслей народного хозяйства. Так, на железнодорожном транспорте, в машиностроении широкое распространение получили магнитные и электромагнитные методы дефектоскопии, использующие магнитные свойства стали [1]. Ферромагнитные свойства материала колёсных пар могут быть использованы при идентификации подвижного состава железных дорог [2]. Во многих электротехнических устройствах – электрических машинах, трансформаторах, магнитных усилителях, исполнительных механизмах – для создания необходимого (усиления) магнитного потока в определённом пространстве используются массивные тела из ферромагнитных материалов. Эффективность решения перечисленных проблем во многом определяется точностью нахождения параметров (напряжённости, индукции) магнитного поля, создаваемого массивным ферромагнитным телом. Поэтому исследование влияния геометрических размеров массивного ферромагнитного тела и его намагниченности на характеристики магнитного поля, создаваемого данным телом, является весьма актуальной проблемой.

Известные теоретические исследования [3, 4] параметров полей магнитной ленты при её продольном и поперечном намагничивании, а также магнитных полей ферромагнитных ци-

*Magnetic field parameters in ferromagnetic body have been investigated. It has been shown that under the conditions of magnetostatics it is possible to obtain magnetic field only if magnetized medium exists, and moreover magnetic field vector can be defined as a gradient of scalar magnetic potential. The expression, which describes dependence of magnetic field strength in magnetized body on its geometric parameters and value of magnetization has been derived with the help of Gauss-Ostrogradsky theorem and formulas of vector analysis.*

линдра, сферы и эллипсоида не решают данной проблемы, так как не устанавливают аналитических зависимостей характеристик их магнитных полей от геометрических размеров и объёма этих тел.

Задачей настоящей работы является исследование магнитного поля, создаваемого намагниченным массивным телом, и установление аналитической зависимости параметров данного поля от геометрических размеров тела и его намагниченности, позволяющей повысить эффективность решения проблем дефектоскопии и идентификации, а также функционирования устройств, принцип действия которых основан на законе электромагнитной индукции.

Выражение, описывающее напряжённость  $\vec{H}$  магнитного поля намагниченного тела, может быть найдено через вектор его намагниченности  $\vec{J}$  [5], распределение которой в объёме тела известно, а вне его всюду отсутствует.

Поле напряжённости  $\vec{H}$  безвихревое и его истоки находятся там же, где и истоки намагниченности  $\vec{J}$ , но имеют противоположные знаки, т.е. там, где обрываются линии  $\vec{J}$ , начинаются линии  $\vec{H}$  и наоборот.

Вне намагниченного тела поле напряжённости  $\vec{H}$  идентично полю магнитной индукции  $\vec{B}$ ,

так как  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J})$ , но  $\vec{J} = 0$ . Внутри магнитной среды линии индукции продолжают непрерывно, так как  $\text{div}\vec{B} = 0$ , то  $\vec{B}$  не имеет истока, но зато имеет вихри там же, где и  $\vec{J}$  – на боковой поверхности. Здесь линии  $\vec{B}$  преломляются, однако условие  $\text{div}\vec{B} = 0$  продолжает выполняться [5].

Если предположить, что  $\vec{A} = \mu_a \vec{I}$  и  $\mu_a = \mu_0 \mu_r = \text{const}$  во всей области магнитного поля, то основные уравнения магнитного поля в условиях статики (т.е. в отсутствии токов) принимают вид [5]:

$$\text{rot}\vec{H} = 0; \quad \text{div}\vec{B} = \text{div}\mu_a \vec{H} = \mu_a \text{div}\vec{H} = 0.$$

Так как дивергенция и ротор напряжённости магнитного поля во всём пространстве равны нулю, то в нём нет ни источников, ни вихрей. А это значит, что сама напряжённость поля тоже везде равна нулю. В магнитостатике можно получить поле только при наличии намагниченной среды, состояние которой определяется вектором намагниченности  $\vec{J}$  [5], причём

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}).$$

Так как

$$\text{div}\vec{B} = \text{div}\mu_0(\vec{H} + \vec{J}) = 0,$$

то

$$\text{div}\mu_0 \vec{H} + \text{div}\mu_0 \vec{J} = 0,$$

поэтому

$$\text{div}\vec{H} = -\text{div}\vec{J}. \quad (1)$$

Если намагниченность  $\vec{J}$  существует в отсутствие электрических токов, то магнитное поле создаётся именно намагниченностью. В условиях магнитостатики магнитное поле безвихревое и поэтому вектор напряжённости  $\vec{H}$  может быть определён как градиент скалярной функции магнитного потенциала  $\varphi_m$  [3]:

$$\vec{H} = -\text{grad}\varphi_m.$$

После подстановки значения  $\vec{H}$  в уравнение  $\text{div}\vec{H} = -\text{div}\vec{J}$  получаем:

$$\text{div}(-\text{grad}\varphi_m) = -\text{div}\vec{J}. \quad (2)$$

Следовательно,

$$\nabla^2 \varphi_m = \text{div}\vec{J}. \quad (3)$$

Таким образом, чтобы определить  $\varphi_m$  необходимо решить уравнение Пуассона:

$$\frac{d^2 \varphi_m}{dx^2} + \frac{d^2 \varphi_m}{dy^2} + \frac{d^2 \varphi_m}{dz^2} = \text{div}\vec{J}.$$

Эта задача решается с помощью теоремы Грина, применимой к объёму  $V$ , ограниченному замкнутой поверхностью  $S$  [6]:

$$\varphi_m = -\frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\Delta \varphi_m}{r} dV - \frac{1}{4\pi} \oint_S \left( \varphi_m \frac{d}{dn} \frac{1}{r} - \frac{1}{r} \frac{d\varphi_m}{dn} \right) ds, \quad (4)$$

где  $r$  – расстояние от заданной точки пространства до некоторой произвольно выбранной начальной точки.

Так как на поверхности  $S$  раздела намагниченного тела и окружающей его среды отсутствует поверхностный ток и равны нормальные составляющие векторов магнитной индукции

$\vec{B}$ , то при переходе через граничные поверхности функция магнитного потенциала  $\varphi_m$  изменяется непрерывно, а её производная  $\frac{d\varphi_m}{dn}$ ,

т.е.  $\text{grad}\varphi_m$  или  $\vec{H}$  претерпевает разрыв [5]. В этом случае теорема Грина применима при условии, что поверхность  $S$  может быть выделена из исследуемого объекта с помощью плотно охватывающей её замкнутой поверхности  $S_0$  [6], причём на обеих сторонах поверхности  $S$  положительные нормали  $\vec{n}_1$  и  $\vec{n}_2$  направлены к данной поверхности разрыва. Поэтому справедливо выражение

$$\frac{d}{dn_1} \frac{1}{r} = -\frac{d}{dn_2} \frac{1}{r}.$$

Следовательно,

$$\lim_{S_0 \rightarrow S} \oint_{S_0} \varphi_m \frac{d}{dn} \frac{1}{r} dS = \int_S \varphi_m \left( \frac{d}{dn_1} \frac{1}{r} + \frac{d}{dn_2} \frac{1}{r} \right) dS = 0. \quad (5)$$

Окончательное выражение функции магнитного потенциала  $\varphi_m$ , если внешняя, ограничивающая рассматриваемое пространство поверхность  $S$  уходит в бесконечность, приобретает вид [6]:

$$\varphi_m = -\frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\Delta \varphi_m}{r} dV + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{1}{r} \left( \frac{d\varphi_m}{dn_1} + \frac{d\varphi_m}{dn_2} \right) dS. \quad (6)$$

Учитывая, что  $\vec{H} = -\text{grad}\varphi_m$ , откуда

$$\Delta \varphi_m = \text{divgrad}\varphi_m = -\text{div}\vec{H}, \quad \text{а} \quad \frac{d\varphi_m}{dn_1} = -H_{1n},$$

$\frac{d\varphi_m}{dn_2} = -H_{2n}$ , получаем:

$$\varphi_m = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\operatorname{div} \vec{H}}{r} dV - \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{H_{1n} + H_{2n}}{r} dS. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что  $\operatorname{div} \vec{H} = -\operatorname{div} \vec{J}$ , а также известное условие непрерывности нормальных составляющих вектора магнитной индукции (поскольку  $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ ), получаем [5]:

$$\varphi_m = -\frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\operatorname{div} \vec{J}}{r} dV + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{J_{1n} + J_{2n}}{r} dS. \quad (8)$$

Так как [7]

$$\operatorname{div} \frac{\vec{J}}{r} = \frac{\operatorname{div} \vec{J}}{r} + \vec{J} \operatorname{grad} \frac{1}{r},$$

то

$$\int_V \frac{\operatorname{div} \vec{J}}{r} dV = \int_V \operatorname{div} \frac{\vec{J}}{r} dV - \int_V \vec{J} \operatorname{grad} \frac{1}{r} dV, \quad (9)$$

где интеграл берётся по всей поверхности.

Первый интеграл правой части последнего уравнения может быть преобразован с помощью теоремы Гаусса–Остроградского, следуя которой нужно взять поверхностный интеграл от  $\vec{J}/r$ , во-первых, по поверхности, уходящей в бесконечность (этот интеграл равен нулю, так как в бесконечности и напряжённость поля, и намагниченность обращаются в нуль), а во-вторых, по тем поверхностям, которые охватывают область разрыва вектора  $\vec{J}$ . Поэтому

$$\int_V \operatorname{div} \frac{\vec{J}}{r} dV = \int_S \frac{J_{1n} + J_{2n}}{r} dS. \quad (10)$$

Подставляя (9) и (10) в уравнение (8), получаем:

$$\varphi_m = \frac{1}{4\pi} \int_V \vec{J} \operatorname{grad} \frac{1}{r} dV. \quad (11)$$

В соответствии с дифференциальными операциями над скалярами и векторами, образованными из радиуса-вектора ( $\vec{r}$ ) и свободных векторов [7],

$$\operatorname{div} \frac{\vec{J}}{r} = -\frac{(\vec{J}\vec{r})}{r^3}; \quad \operatorname{grad} \frac{1}{r} = -\frac{\vec{r}}{r^3}.$$

Поэтому

$$\int_V \vec{J} \operatorname{grad} \frac{1}{r} dV = \int_V \operatorname{div} \frac{\vec{J}}{r} dV$$

и

$$\varphi_m = \frac{1}{4\pi} \int_V \operatorname{div} \frac{\vec{J}}{r} dV. \quad (12)$$

Следовательно,

$$\vec{H} = -\operatorname{grad} \varphi_m = -\frac{1}{4\pi} \int_V \operatorname{grad} \operatorname{div} \frac{\vec{J}}{r} dV. \quad (13)$$

Но по [7]

$$\operatorname{grad} \operatorname{div} \frac{\vec{J}}{r} = -\frac{\vec{J}}{r^3} + \frac{\vec{r}3(\vec{J}\vec{r})}{r^5},$$

поэтому

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left( \frac{\vec{J}}{r^3} - \frac{\vec{r}3(\vec{J}\vec{r})}{r^5} \right) dV. \quad (14)$$

Таким образом, пространственное распределение напряжённости магнитного поля, создаваемого намагниченным телом, определяется значением его вектора намагниченности и геометрическими параметрами данного тела. Установленная аналитическая зависимость может быть использована для расчёта магнитного потока в определённой части пространства при разработке устройств дефектоскопии и идентификации транспортных средств или промышленных изделий, а также при проектировании устройств, принцип действия которых основан на законе электромагнитной индукции, с целью повышения эффективности их функционирования.

#### Список литературы

1. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте / Под ред. А.К. Гуревича. М.: Транспорт, 1983.
2. Придубков П.Я. Формирование информационных сообщений подвижным составом в системах автоматического управления железнодорожным транспортом: Дис. ... канд. техн. наук. Харьков, 2001.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Высшая школа, 1986.
4. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч.3. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия, 1969.
5. Шимони К. Теоретическая электротехника. М.: Мир, 1964.
6. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976.
7. Маделунг Э. Математический аппарат физики. М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1960.

Придубков Павел Яковлевич – работает в Украинской академии железнодорожного транспорта, канд. техн. наук. Окончил факультет автоматики и телемеханики УЗПИ в 1980 г. Защитил диссертацию по теме "Формирование информационных сообщений подвижным составом в системах автоматического управления железнодорожным транспортом" в 2001 г.

## Правила оформления статей, направляемых в журнал "Электротехника"

1. Объем статьи не должен превышать **12 страниц текста**, отпечатанного на машинке или набранного на компьютере **через 2 интервала** с полями 2–3 см, и иметь **не более 5 рисунков**.

2. В статье должны быть: введение, сформулирована постановка задачи, изложено содержание работы, показана достоверность результатов, приведены выводы, рекомендации и эффективность.

К статье должна быть приложена аннотация (2–3 предложения) на русском и английском языках.

Название статьи также следует дать на русском и английском языках.

3. Статья должна сопровождаться письмом автора или организации (если она упоминается) и сведениями об авторах. Необходимо привести фамилии, имена и отчества всех авторов полностью, домашние адреса с почтовыми индексами, номера домашнего и служебного телефонов, место работы, ученое звание и степень, какой факультет, какого вуза и когда закончен, тему диссертации и год ее защиты. Можно приложить фотографии авторов.

Желательно, чтобы число авторов **не превышало пяти**. Фамилии лиц, принимавших участие в работе, можно дать в сноске.

4. Формулы должны быть чётко вписаны от руки или набраны на компьютере (крупно) в отдельные строчки (а не в текст). Прописные (заглавные) буквы подчеркиваются карандашом двумя черточками снизу, а строчные (малые) – двумя черточками сверху. 0 (ноль) и цифра 3 (три) поясняются на полях простым карандашом. Индексы показываются простым карандашом.

5. Таблицы не должны быть громоздкими, все наименования необходимо писать без сокращения слов, за исключением единиц измерения. Численные значения величин в таблице, на рисунках и в тексте статьи должны быть в единицах измерения СИ.

6. Чертежи, графики, диаграммы и т.д. должны быть выполнены чётко. Возможно изготовление рисунков с помощью компьютера. Условные обозначения на самом рисунке должны быть предельно краткими и общеупотребительными. Расшифровка условных обозначений и подписи к рисункам (не громоздкие) даются на отдельном листе.

Фотографии к статье (в двух экземплярах) должны быть отпечатаны на белой матовой бумаге (размером не менее 9×12 см), изображение должно быть контрастным, с хорошо проработанными деталями. **Если фотографии присылаются на дискетах, то разрешение должно быть не менее 300 пикселей на дюйм и размеры фотографии не очень велики.** Все обозначения ставятся на отдельном экземпляре.

7. Список литературы приводится в конце статьи, в порядке последовательности ссылок в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки.

Для книг должны быть указаны: фамилия и инициалы всех авторов, название книг, город, издательство, год выпуска. Для журнальной статьи: фамилия и инициалы всех авторов, название статьи, журнала, год издания, номер журнала (том), страницы. Для сборников и продолжающихся изданий: фамилия и инициалы всех авторов конкретной статьи, ее название, название сборника или издания, город, издательство, год, выпуск, страницы.

В список литературы не должны включаться неопубликованные материалы, материалы для служебного пользования, а также малораспространенные издания и материалы, отпечатанные литографическим способом, и т.д.

8. Статью в двух экземплярах (с дискетой) следует высылать в редакцию **простой** или **заказной бандеролью** или по e-mail [elektrotechnika@mtu-net.ru](mailto:elektrotechnika@mtu-net.ru).