

**ISSN 0013-5860**





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

МЕДАЛЬ  
“ЗА ЗАСЛУГИ В  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ”



## УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)  
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ» (г. САРАНСК)

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

АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)

АО «ВЭЛНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)

АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)

АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)

НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)

АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

## СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

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

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

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

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

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.

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

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

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

Редактор отдела О.В. Кунавина.

Научный редактор Л.А. Романова.

Редактор З.П. Фёдорова

Сдано в набор 06.02.2006. Подписано в печать 05.04.2006. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 127.

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», 2006 г. Тюменская областная универсальная научная библиотека

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

**Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф., Карпенко О.И., Закамский Е.В.** Локационный мониторинг неоднородностей распределительных электрических сетей ..... 2

**Казаков Ю.Б., Козлов А.Б., Коротков В.В.** Учёт изменения потерь холостого хода трансформаторов в период срока службы при расчёте потерь в распределительных сетях ..... 11

**Орлов Ю.А., Сорин Л.Н.** Исследование напряжений на элементах входного фильтра при воздействии импульса перенапряжения с крутым фронтом .... 16

### ЭЛЕКТРОПРИВОД

**Хечуев Ю.Д., Калашников Б.Е., Ольшевский В.И.** Частотно-регулируемые электроприводы тягодутьевых и насосных механизмов котельных на базе преобразователей частоты АТ корпорации "Триол" ..... 23

**Крутиков К.К., Рожков В.В., Петрухин Ю.В.** Анализ и моделирование симплексных алгоритмов управления трёхфазными автономными инверторами напряжения для частотного асинхронного электропривода ..... 31

**Афонин В.И., Балабанов И.Н.** Регулируемый электропривод лифтов с асинхронными электродвигателями ..... 37

**Макаров Л.Н.** Современный электропривод скоростных лифтов повышенной комфортности ..... 42

### ТРАНСФОРМАТОРЫ. РЕАКТОРЫ

**Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Лурье А.И., Базылев Б.И., Уколов С.В., Зайцев А.И., Соколов Ю.В., Ахметжанов Н.Г.** Ввод в эксплуатацию управляемого подмагничивания шунтирующего реактора мощностью 180 МВ·А, 500 кВ ..... 47

### ИССЛЕДОВАНИЯ

**Пронин М.В.** Моделирование и анализ системы с многофазным асинхронным генератором и многотактным активным выпрямителем ..... 55

### НИЗКОВОЛЬТНЫЕ АППАРАТЫ

**Зекцер Д.М.** Мониторинг заказов электротехнических низковольтных аппаратов ..... 61

В Академии электротехнических наук РФ ..... 63

**Изяслав Борисович Пешков** ..... 65

## CONTENTS

### ELECTRIC MAINS

**Minullin R.G., Fardiev I.Sh., Gubaev D.F., Karpenko O.I., Zakamskii E.V.** Location monitoring of distribution electric power lines heterogeneities ..... 2

**Kazakov Yu.B., Kozlov A.B., Korotkov V.V.** Account of changing the losses of run idle of transformers at period of lifetime at calculation of losses in distributing networks ..... 11

**Orlov Yu.A., Sorin L.N.** Investigation of voltages on the input filter components effected by surge pulse with a steep front ..... 16

### ELECTROPRIVOD

**Khechuev Yu.D., Kalashnikov B.E., Olishevskiy V.I.** It is frequency-adjustable electric drives mechanisms and pump on the basis of converters frequency AT corporation "Triol" ..... 23

**Krutikov K.K., Rozhkov V.V., Petrukhin Yu.V.** The analysis and modeling of simplex algorithms of management three-phase independent inverters of a voltage for the frequency asynchronous electric drive ..... 31

**Afonin V.I., Balabanov I.N.** Controlled electroprivod lift with anisochronous electric motor ..... 37

**Makarov L.N.** The adjustable electric drive of lifts comfort ..... 42

### TRANSFORMERS. REACTORS

**Bryancev A.M., Dolgopolov A.G., Lurie A.I., Bazylev B.I., Ukolov S.V., Zaitsev A.I., Sokolov YU.V., Akhmetzhanov N.G.** Putting into operation the shunted reactor run by magnetic bias with 180MB·A, 500kV . 47

### RESEARCHES

**Pronin M.V.** Modeling and analysis of system with multi-phase induction generator and multi-stage active rectifier..... 55

### LOW-VOLTAGE DEVICES

**Zekcer D.M.** Monitoring the orders electrotechnical nizkovolitnye devices ..... 61

In Academies electrotechnical sciences RF ..... 63

**Izyaslav Borisovich Peshkov** ..... 65

## Локационный мониторинг неоднородностей распределительных электрических сетей

МИНУЛЛИН Р.Г., ФАРДИЕВ И.Ш., ГУБАЕВ Д.Ф., КАРПЕНКО О.И., ЗАКАМСКИЙ Е.В.

Определены импульсные реакции неоднородностей электролиний распределительных сетей, каковыми являются места присоединения ответвлений, короткие замыкания и обрывы проводов, кабельные вставки, муфты, места с ухудшенной изоляцией и т.д. Установлены закономерности изменений формы отражённых импульсов в зависимости от характера и значения неоднородностей. Сведения необходимы для распознавания рефлекограмм электролиний при локационном мониторинге распределительных сетей с целью дистанционного и оперативного обнаружения аварийных и предаварийных ситуаций.

Воздушные и кабельные линии электропередачи, связи и телекоммуникаций являются проводящими структурами в виде металлических проводов. Обеспечение их высокой надёжности и бесперебойности функционирования является основной задачей эксплуатационных служб.

Воздушные линии подвергаются воздействию ветра, гололеда, резкого перепада температур, внутренних перенапряжений, при этом могут возникать КЗ и обрывы проводов. Повреждения кабельных линий могут возникать из-за подвижки грунта, землеройных работ. Причинами повреждения электрических сетей могут быть лесные пожары, оползни, нарушение правил проведения строительных работ вблизи трасс линий и т.д.

Значительную часть времени устранения повреждений линии составляет процесс отыскания места повреждения. Поэтому ускорение поиска позволяет значительно сократить аварийный недоотпуск электроэнергии, вызывающий значительные финансовые потери для предприятий электроснабжения.

Для определения места повреждения (ОМП) линии применяются дистанционные и топографические методы. С помощью первых определяют зону, в пределах которой находится повреждение, с помощью вторых внутри зоны находят точное место повреж-

*Impulse reactions of distributive electric power lines heterogeneities, e.g. branches connections, shortings and ruptures of wires, cable inserts, places with deteriorated isolation, etc., are detected. Regularities in the changes of the form of reflected impulses depending on the character and size of heterogeneities are established. The data are important to interprete the reflectograms of electric power lines using location monitoring of distribution lines for distant and operative detection of emergencies.*

дения, что крайне необходимо для подземных кабелей [1, 2].

Среди многих методов ОМП наиболее интересен локационный метод, который является дистанционным (зондирование линии из одной точки без её обхода), оперативным (быстродействие исчисляется микросекундами), универсальным (определяются КЗ и обрывы проводов, неоднородности линии, уменьшения и изменения вида нагрузок) [1,2].

Электролинии и коммуникационные линии могут иметь линейную или древовидную топологию. Диагностика локационными методами линейных структур или отдельных линейных участков древовидных структур в настоящее время не представляет больших технических трудностей [1, 2].

Значительно сложнее выполнить диагностику состояния древовидных структур, где каждое место присоединения ответвления к основной линии является неоднородностью линии, так как здесь волновое сопротивление линии отклоняется от своего среднего значения [3]. Эти неоднородности порождают многократные отражения зондирующего импульса. К неоднородностям линии относятся также места обрывов и КЗ проводов, места с кабельными вставками в воздушных линиях и муфтами в кабельных линиях, места с токовыми утечками по загрязнённым изолято-

рам в воздушных линиях и за счёт ухудшения изоляции в кабельных линиях, места транспозиции и сближения проводов и т.д. Картина отражённых импульсов напряжения при локационном зондировании, называемая рефлекограммой, в этом случае становится очень сложной, так как она является суммой многократно отражённых импульсов с различными полярностями, амплитудами и длительностями [4].

Контроль работоспособности электролинии сводится к своевременному обнаружению возникших в ней повреждений. Это могут быть КЗ и обрывы проводов. При локационном мониторинге линейных проводов импульсы напряжения, отражённые от мест КЗ и обрывов, на рефлекограммах обнаруживаются уверенно и однозначно [1, 2].

Но при локационном зондировании электролиний с древовидной топологией на рефлекограммах наряду с импульсами, свидетельствующими об аварии, присутствуют импульсы, отражённые от мест присоединения ответвлений, от их концов, кабельных вставок, муфт и других неоднородностей линии [4]. Выделить импульсы, соответствующие повреждениям, среди этой массы отражённых импульсов – весьма сложная задача. Её решить можно только в том случае, если знать импульсную реакцию и закономерности её изменения для каждой неоднородности линии [5]. Некоторые сведения об отражениях импульсных сигналов от возможных неоднородностей линий можно найти в [1], но сведения эти не полные и приведённых данных совершенно недостаточно для распознавания рефлекограмм древовидных проводящих структур. Поэтому необходимо установить диагностические признаки неоднородностей, которые присутствуют в реальных электролиниях с древовидной топологией, и выявить возможную трансформацию формы импульсов напряжения, отражённых от этих неоднородностей [6].

Линии электропередачи и связи всегда заканчиваются нагрузкой. В нормальном режиме в линиях электропередачи нагрузкой являются первичные обмотки трансформаторов подстанций, а в линиях связи – обмотки согласующих трансформаторов или входные сопротивления приёмных усилительных устройств.

При возникновении аварийных ситуаций нагрузкой линии может стать сопротивление, равное нулю (в случае КЗ), бесконечности (в случае обрыва линии) или некоторому значению, отличному от волнового сопротивления (в случае ухудшения изоляции). Нагрузки линий и неоднородности в линиях могут быть активными или реактивными (ёмкостными или индуктивными). Перечисленные виды нагрузок и неоднородностей являются сосредоточенными и при модельных исследованиях могут быть заменены резисторами, конденсаторами и катушками индуктивностей с соответствующими номиналами.

Знание характера отражённого сигнала при различных значениях активного сопротивления нагрузки или неоднородности играет важную роль при распознавании рефлекограмм.

С использованием рефлектометра РЕЙС-105Р были выполнены исследования зависимости формы отражённых импульсов напряжения  $U$  от изменения резистивной нагрузки  $R_h$  на конце кабельной линии (рис.1). Как активная нагрузка линии использовались непроволочные резисторы, так как они являются более высокочастотными, чем другие типы резисторов. В качестве линии использовался кабель РК 75-9-12 с волновым сопротивлением  $Z_b = 75 \text{ Ом}$  и длиной 107 м. Зондирование производилось положительными импульсами с длительностями 0,05; 0,1 и 0,5 мкс.

На рис.1 видно, что при малых значениях нагрузочного сопротивления импульс напряжения, отражённый от конца линии, имеет отрицательную полярность, т.е. произошло изменение полярности импульса, поданного в линию. При равенстве нагрузочного сопротивления волновому сопротивлению линии, в данном случае 75 Ом, отражённый импульс полностью исчезает, так как в линии устанавливается режим бегущих волн. При нагрузках, превышающих волновое сопротивление линии, импульс, отражённый от конца линии, сохраняет свою полярность. При больших значениях нагрузочного сопротивления (в данном случае при  $R_h > 1 \text{ кОм}$ ) в линии создается режим, близкий к ХХ.

Рефлекограммы, представленные на рис.1, сняты при различных длительностях  $\tau$  зондирующего импульса. При  $\tau = 0,05 \text{ мкс}$

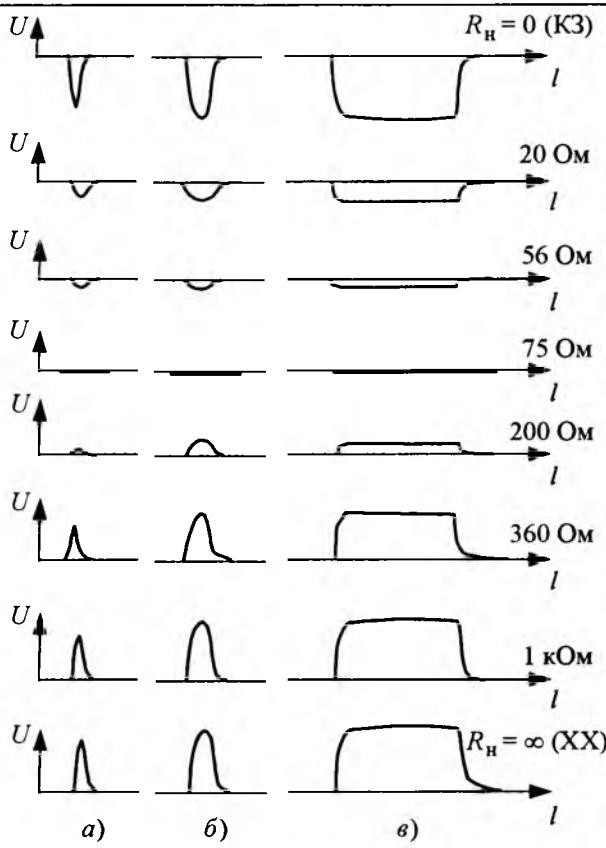


Рис.1. Зависимость формы отражённых импульсов от изменения резистивной нагрузки  $R_h$  на конце кабельной линии при длительностях зондирующего импульса  $\tau$ :

*а* – 0,05 мкс; *б* – 0,1 мкс; *в* – 0,5 мкс

(рис.1,*а*) амплитуда отражённого импульса не успевает достичь своего возможного максимума, поэтому его амплитуда занижена. В случае появления шумов обнаружение такого импульса на их фоне будет затруднено. При  $\tau = 0,1$  мкс (рис.1,*б*) амплитуда отражённого импульса почти достигает своего максимального значения, и импульс имеет форму, близкую к треугольной. При  $\tau = 0,5$  мкс (рис.1,*в*) отражённый импульс имеет устойчивую трапециoidalную форму, но в этом случае ухудшается разрешающая способность импульсного зондирования. Можно сделать вывод, что для линии длиной 107 м при её полосе пропускания оптимальная длительность зондирующего импульса равна 0,1 мкс. Таким образом, при локационных измерениях на линии необходимо предварительно выбрать длительность импульса, которая будет оптимальной для её длины (полосы пропускания).

Аналогичные исследования с изменением значения нагрузки были проведены и для воздушной линии с волновым сопротивлением 430 Ом. Получены такие же закономерности изменения формы отражённых импульсов, как и в случае с кабельной линией.

При посылке в линию зондирующего сигнала (прямая волна) от места возникновения неоднородности происходит отражение посланного сигнала (обратная волна). Отношение комплексного напряжения (тока) обратной волны в конце линии  $U_{\text{обр}}$  к напряжению (току) прямой волны  $U_{\text{пр}}$  называется коэффициентом отражения [1, 7]:

$$K = \frac{U_{\text{обр}}}{U_{\text{пр}}} = \frac{Z_h - Z_b}{Z_h + Z_b},$$

где  $Z_h$  – сопротивление нагрузки;  $Z_b$  – волновое сопротивление линии.

Импульс, отражённый от места КЗ на линии, меняет полярность на противоположную по отношению к зондирующему импульсу, при этом  $K = -1$ . Импульс, отражённый от места обрыва (XX), сохраняет полярность, при этом  $K = 1$  (рис.1).

Графики изменения коэффициента отражения  $K$  в зависимости от значения резистивной нагрузки  $R_h$  для исследуемых кабельной и воздушной линий представлены на рис.2.

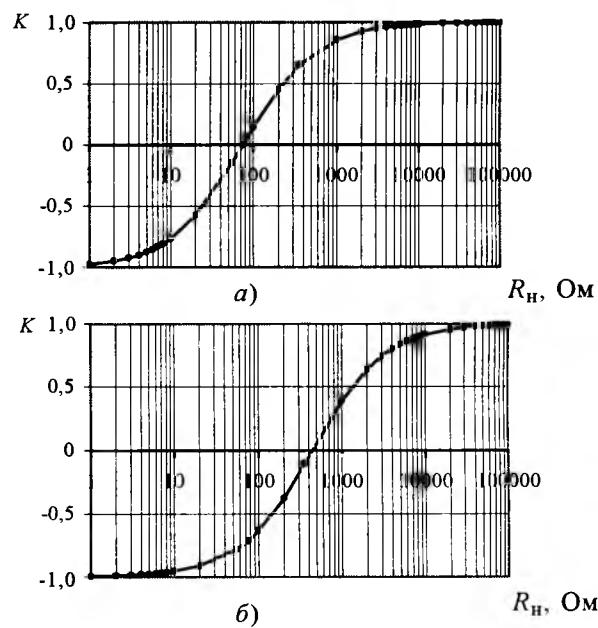


Рис.2. Зависимость коэффициента отражения  $K$  импульса от значения сопротивления активной нагрузки  $R_h$  при  $\tau = 0,1$  мкс:

*а* – для кабельной линии ( $Z_b = 75$  Ом); *б* – для воздушной линии ( $Z_b = 430$  Ом)

Согласно рис.2, при  $Z_b > R_h$ , т.е. при прохождении сигналом границы между большим и малым сопротивлениями линии, отражённый импульс меняет свою полярность на противоположную, при  $Z_b < R_h$ , т.е. при прохождении сигналом границы между меньшим и большим сопротивлениями, импульс сохраняет свою полярность. Амплитуда отражённого импульса, следовательно, и коэффициент отражения  $K$  тем больше, чем больше расхождение между граничными сопротивлениями в месте сочленения. В этих случаях в линии существует режим смешанных волн. При  $R_h = Z_b$  – отражения в линии отсутствуют, вся излучаемая мощность выделяется на сопротивлении нагрузки и в линии создаётся режим бегущих волн.

В результате измерений, выполненных на кабельных и воздушных линиях, были определены "граничные" значения сопротивлений нагрузки для исследуемых линий. Увеличение активной нагрузки выше граничного значения почти не приводит к изменению формы и амплитуды отражённого импульса. Найдено, что чем выше волновое сопротивление линии, тем выше граничное значение нагрузки. Для исследуемой кабельной линии граничное значение активной нагрузки при  $K > 0,85$  примерно 1 кОм (рис.1 и 2), а для исследуемой воздушной линии около 10 кОм (рис.2).

Исследования показали, что, если  $R_h < < 0,5Z_b$ , то в линии устанавливается режим, близкий к КЗ, а если  $R_h > 5Z_b$ , то возникает режим, близкий к ХХ.

Для более полной передачи энергии импульса по проводам необходимо согласовать сопротивление нагрузки с волновым сопротивлением линии ( $R_h = Z_b$ ), т.е. необходимо стремиться уменьшить отражённый сигнал. При диагностике электролиний локационным методом наоборот, чем больше амплитуда импульса, отражённого от неоднородности исследуемой линии, тем легче он выделяется на рефлектограмме на фоне других отражений.

При распознавании рефлектограмм особую роль играет импульс, отражённый от конца линии или от конца ответвления. В реальных электролиниях на их концах и на

концах ответвлений нет нагрузки, равной их волновому сопротивлению. Линии и ответвления на концах "нагружены" на обмотки трансформаторов или трансформаторы могут быть отключены, тогда сопротивления на концах линии равны бесконечности. Если локационным методом исследуются неоднородности, находящиеся не на конце линии, то наряду с импульсами, отражёнными от них, на рефлектограмме будут присутствовать и импульсы, отражённые от конца линии и концов ответвлений. Рефлектограмма при этом значительно усложняется, и её расшифровка становится весьма затруднительной.

На линиях электропередачи возможны случаи изменения волнового сопротивления на отдельных участках самой линии. Это могут быть неоднородности в виде кабельных вставок на воздушных линиях и муфт в кабельных линиях. Место соединения двух линий или устройств с различными волновыми сопротивлениями порождает отражённые сигналы.

В лабораторных условиях часть воздушной линии ( $Z_b = 430$  Ом), представляющей собой два медных провода, заменялась кабелем ( $Z_b = 75$  Ом) марки РК 75-9-12 длиной 27 м. Схема созданной линии представлена на рис.3, соответствующая ей рефлектограмма, полученная с помощью рефлектометра РЕЙС-105Р, приведена на рис.4. Зондирование осуществлялось положительными импульсами с амплитудой 3,5 В и длительностью 0,039 мкс.

На рис.4 видно, что в месте присоединения (точка А) кабельной вставки однородность линии нарушается. Волновое сопротивление воздушной линии больше, чем волновое сопротивление кабельной вставки, поэтому



**Рис.3. Схема воздушной линии с кабельной вставкой:**  
A – начало кабельной вставки; B – конец кабельной вставки; V – разомкнутый конец воздушной линии

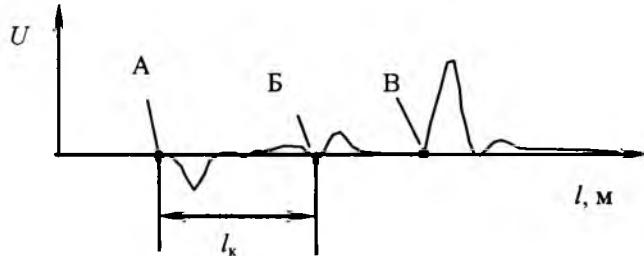


Рис.4. Рефлектометрическая диаграмма воздушной линии с кабельной вставкой длиной  $l_k = 27 \text{ м}$ :

$A$  – импульс, отраженный от начала кабельной вставки;  $B$  – от конца кабельной вставки;  $V$  – от конца разомкнутой линии

му отраженный импульс  $A$  имеет отрицательную полярность (согласно условиям рис.2). Концу  $B$  кабельной вставки соответствует импульс  $B$  положительной полярности, так как происходит переход от меньшего волнового сопротивления кабеля к большему волновому сопротивлению воздушной линии. От конца разомкнутой линии отражается импульс  $V$ . В рефлектометрии импульсы идентифицируются по началу переднего фронта импульса.

В месте подключения рефлектометра к линии также возникают переотражения сигналов, если выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  генератора зондирующих импульсов не равно волновому сопротивлению  $Z_B$  измеряемой линии. В зависимости от соотношения  $R_{\text{вых}}$  и  $Z_B$  изменяется полярность и амплитуда переотраженных импульсов, как показано на рефлектометрических диаграммах рис.5.

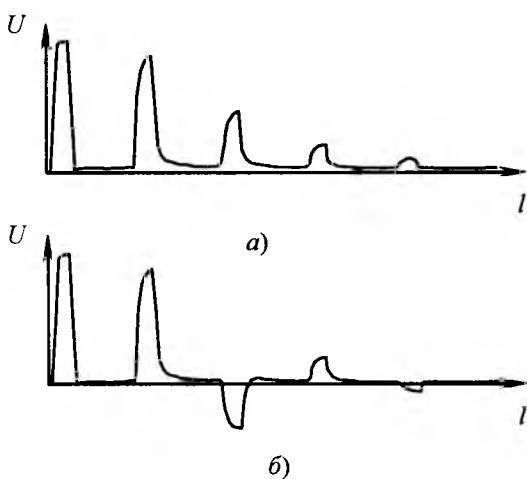


Рис.5. Рефлектометрические диаграммы при несогласованности выходного сопротивления рефлектометра с волновым сопротивлением линии:

$a - R_{\text{вых}} > Z_B$ ;  $b - R_{\text{вых}} < Z_B$

Если  $R_{\text{вых}} > Z_B$ , то все кратные импульсы, отражаясь от места подключения рефлектометра к линии и от разомкнутого конца линии, сохраняют свою полярность (рис.5, $a$ ). Если  $R_{\text{вых}} < Z_B$ , то импульсы, отражаясь от места подключения рефлектометра к линии, меняют свою полярность и наблюдается чередование полярности отраженных импульсов (рис.5, $b$ ).

При  $R_{\text{вых}} \neq Z_B$  амплитуда переотраженных кратных импульсов может оказаться соизмеримой с амплитудой импульсов, отраженных от других неоднородностей, что значительно усложняет рефлектометрическую диаграмму и затрудняет ее расшифровку. Необходимо, меняя  $R_{\text{вых}}$ , добиться условия  $R_{\text{вых}} = Z_B$ , в этом случае многократные отражения исчезнут.

При нагрузке линии, имеющей реактивный характер, отраженные от нее импульсы, испытывают дифференцирующие и интегрирующие воздействия в зависимости от вида и значения реактивности.

Изменения формы отраженных импульсов напряжения  $U$  при увеличении ёмкостной нагрузки  $C_h$  представлены на рис.6. В качестве линии использовался кабель РК 75-9-12 длиной 107 м с волновым сопротивлением 75 Ом. Зондирование производилось импульсами с длительностями, равными 0,05; 0,1 и 0,5 мкс.

При сопоставлении рефлектометрических диаграмм хорошо видна динамика изменения формы и амплитуды отраженных импульсов с изменением нагрузки и длительности зондирующего импульса. При малой ёмкостной нагрузке  $C_h = 470 \text{ пФ}$  отраженный импульс имеет положительную полярность, т.е. на конце линии режим, близкий к ХХ. С увеличением ёмкости у отраженного импульса появляются положительный и отрицательный выбросы. При ёмкости выше 0,05 мкФ в отраженном импульсе превалирует отрицательная часть, т.е. на конце линии режим, близкий к КЗ.

Оптимальная длительность зондирующих импульсов, как и в случае активной нагрузки, равна 0,1 мкс, так как длина кабеля, следовательно, и его полоса пропускания не изменились.

Такая же тенденция изменения формы отраженных импульсов при различной ёмкостной нагрузке наблюдалась и на макете воздушной линии.

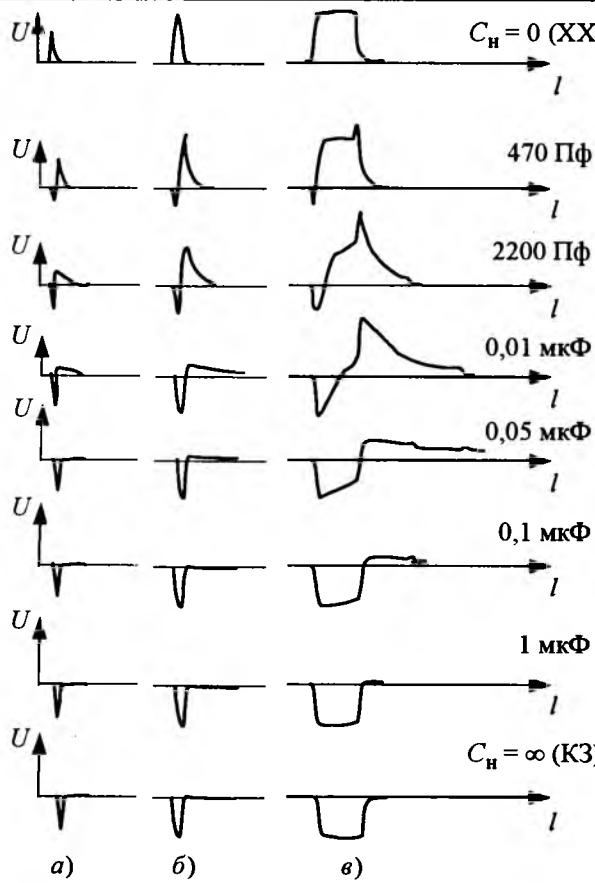


Рис.6. Зависимость формы отражённых импульсов от изменения ёмкостной нагрузки  $C_H$  на конце кабельной линии при длительностях зондирующего импульса  $\tau$ :

*a* – 0,05 мкс; *б* – 0,1 мкс; *в* – 0,5 мкс

Графики изменения нормированных амплитуд  $U_{\text{нор}}$  частей отражённого импульса оптимальной длительности при различных значениях ёмкостной нагрузки  $C_H$  для кабельной линии представлены на рис. 7.

Для анализа рефлектограмм, полученных при зондировании линий распределительных сетей, необходимо знать примерное значение ёмкости, образованной проводами ответвлений, так как от него будет зависеть форма отражённого сигнала.

Были рассчитаны погонные ёмкости для линий электропередачи напряжением 35 и 110 кВ, выполненных стальалюминиевыми проводами со стандартным диаметром и длиной от 500 м до 10 км. Наименьшая погонная ёмкость при этом 4000 пФ. Если эту ёмкость отнести к месту присоединения ответвления, выполненного из этих проводов,

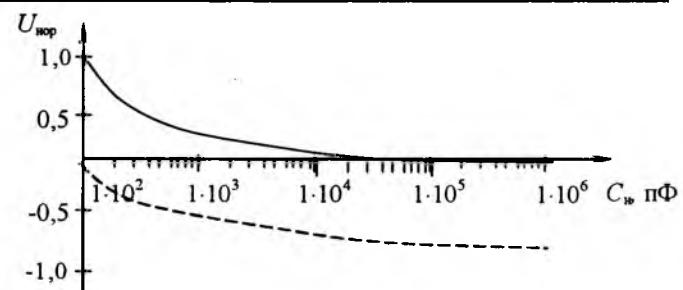


Рис.7. Графики изменений нормированных амплитуд  $U_{\text{нор}}$  положительной (—) и отрицательной (---) частей отражённого импульса с увеличением ёмкостной нагрузки  $C_H$  для кабельной линии при оптимальной длительности импульса  $\tau = 0,1$  мкс

то согласно рис. 7, следует ожидать, что в отражённом импульсе будет превалировать отрицательная часть.

Как было сказано, обычно линии присоединяются к обмоткам различных трансформаторов, поэтому были выполнены исследования зависимости формы отражённых импульсов напряжения  $U$  от изменения индуктивной нагрузки  $L_H$  на конце кабельной линии длиной 107 м с волновым сопротивлением 75 Ом. На рис.8 представлены соответствующие рефлектограммы, снятые при длительностях зондирующих импульсов 0,05; 0,1 и 0,5 мкс. Видно, что трансформация формы отражённых импульсов при изменении индуктивной нагрузки происходит также, как и при изменении ёмкостной нагрузки, но только в обратной полярности.

Согласно рис.8, при индуктивности  $L_H > 300$  мГн положительная часть отражённого импульса превалирует, т.е. на конце линии устанавливается режим, близкий к XX.

Графики изменения нормированных амплитуд  $U_{\text{нор}}$  частей отражённого импульса оптимальной длительности ( $\tau = 0,1$  мкс) при увеличении индуктивной нагрузки  $L_H$  кабельной линии представлены на рис.9.

Были рассчитаны индуктивности обмоток трансформаторов напряжения (марки ТМ, ТМН, ТРДН) различной мощности, предназначенных для работы в сетях напряжением 6–35 кВ. Согласно расчётам наименьшая индуктивность обмоток трансформаторов  $L_{\text{тр}}$  независимо от высшего напряжения трансформатора составляет 3 мГн, что значительно превышает 300 мГн, когда в соответствии

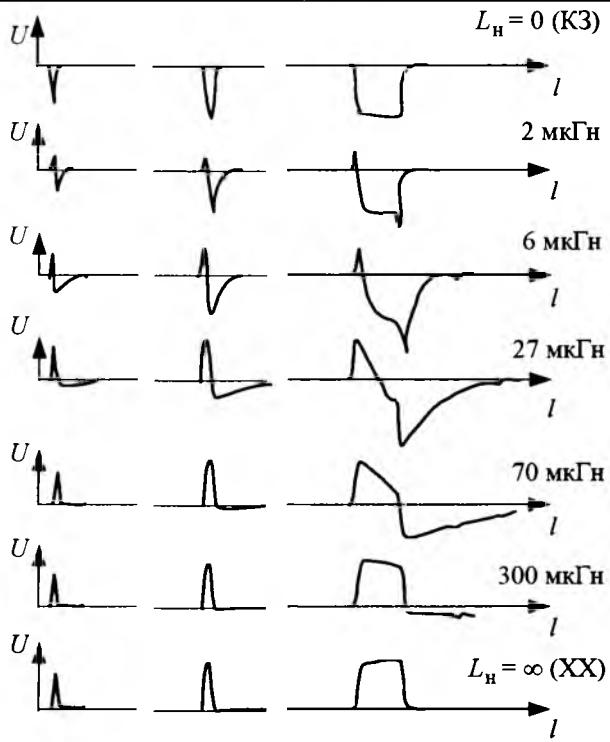


Рис.8. Зависимость формы отражённых импульсов от изменения величины индуктивной нагрузки  $L_H$  на конце кабельной линии при длительностях зондирующего импульса  $\tau$ :

$a - 0,05 \text{ мкс}; b - 0,1 \text{ мкс}; c - 0,5 \text{ мкс}$

с рис.8 и 9 импульс становится практически положительным.

С помощью прибора РЕЙС-105Р были выполнены исследования реакции реальных трансформаторов напряжения различной мощности в ремонтном цехе Приволжских электрических сетей. Было установлено, что полярность отражённого импульса не изменяется, однако с увеличением мощности трансформатора прослеживается тенденция

уменьшения амплитуды импульса. Такие же результаты были получены при импульсном зондировании действующих трансформаторов напряжения трансформаторных пунктов распределительных сетей.

Таким образом, благодаря большой индуктивности обмоток трансформаторов распределительных сетей, измеряемой единицами и десятками миллигенри, зондирующий импульс рефлектометра отражается от них без изменения полярности, но с амплитудой несколько меньшей, чем в случае обрыва проводов (XX) на месте подключённой обмотки. С увеличением мощности трансформатора и уменьшением индуктивности его обмотки амплитуда отражённого импульса уменьшается. При распознавании рефлексограмм можно считать, что места присоединения обмоток трансформаторов к линии создают режим, близкий к режиму XX.

Подключение ответвления к линии можно рассматривать не только как присоединение ёмкостной нагрузки, как это было сделано выше, но и как параллельное присоединение ответвления с волновым сопротивлением, уменьшающим общее волновое сопротивление в месте присоединения. Поэтому следует ожидать, что импульс, отражённый от места присоединения ответвления, будет всегда отрицательным, согласно положениям, рассмотренным выше.

В месте подсоединения ответвления результирующее волновое сопротивление уменьшается вдвое (параллельное соединение одинаковых сопротивлений линии и ответвления). В месте ответвления возникает

отрицательный отражённый импульс, проходящий дальше по линии преамплифицированный импульс имеет положительную полярность. Ответвления вносят существенные затухания в линию, а возникшие отражённые импульсы усложняют рефлексограмму.

На рис.10 и 11 представлены рефлексограммы линий с одним и двумя ответвлениями соответственно. В качестве линий использовался кабель РК 75-9-12, концы ответвлений и линий разомкнуты. Зондирующий импульс  $A$  имел длительность  $\tau = 0,027 \text{ мкс}$ . На рис.10, 11 размеры линий и соот-

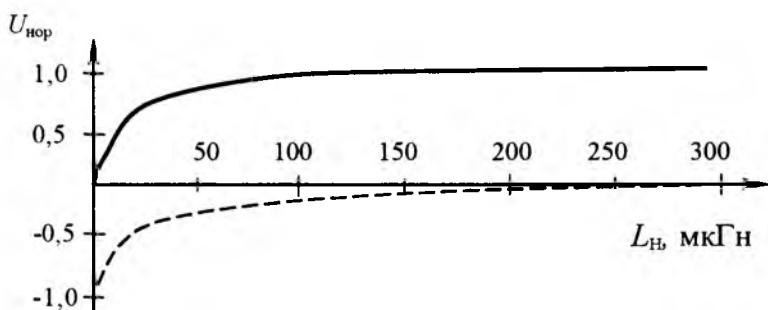


Рис.9. Графики изменений нормированных амплитуд  $U_{\text{нор}}$  положительной (—) и отрицательной (- - -) частей отражённого импульса с увеличением индуктивной нагрузки  $L_H$  для кабельной линии при оптимальной длительности импульса  $\tau = 0,1 \text{ мкс}$

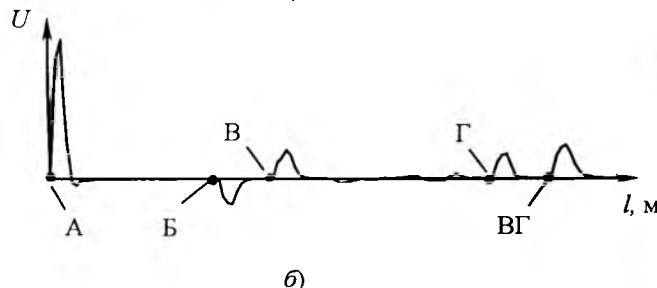
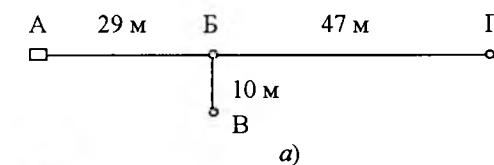


Рис.10. Схема линии с одним ответвлением (а) и соответствующая ей рефлектомограмма (б):

$B$  – отражение от разомкнутого конца ответвления;  $G$  – отражение от разомкнутого конца линии;  $B$  – отражение от места подключения ответвления;  $BG$  – отражение от разомкнутых концов линии и ответвления

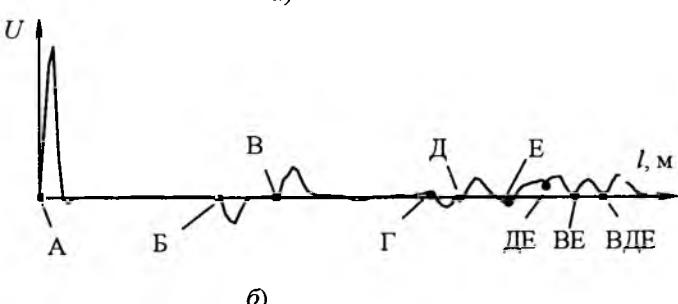
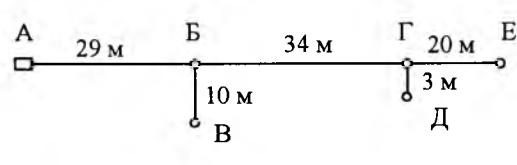


Рис.11. Схема линии с двумя ответвлениями (а) и соответствующая ей рефлектомограмма (б):

$B$  – отражение от конца первого ответвления;  $D$  – отражение от конца второго ответвления;  $E$  – отражение от конца линии;  $B$  – отражение от места подключения первого ответвления;  $G$  – отражение от места подключения второго ответвления

ветствующие им рефлектомограммы приведены в одном масштабе.

На рефлектомограмме рис.10 хорошо видны импульсы, отражённые от неоднородностей линии (место подсоединения ответвления точка  $B$ , концы ответвления точка  $B$  и линии точка  $G$ ). В месте подсоединения ответвления отраженный импульс  $B$  имеет отрицательную полярность, а импульсы, отразившиеся от разомкнутого конца ответвления – импульс  $B$  и от разомкнутого конца линии – импульс  $G$ , имеют положительную полярность. Импульс  $BG$  представляет собой сумму амплитуд двух импульсов, прошедших одинаковые расстояния, но разными путями: первый путь – через точки  $ABBBGBA$ , второй путь – через точки  $ABGBBBA$ , поэтому суммарная амплитуда этого импульса больше амплитуды одиночного импульса  $G$ . Расстояние, пройденное импульсом  $BG$ , можно использовать как контрольное при анализе рефлектомограмм.

Из рефлектомограммы рис.11 следует, что из-за большего удаления второго ответвления от начала линии амплитуды обусловленных им отражённых импульсов  $G$  и  $D$  уменьшаются из-за затухания линии по сравнению с амплитудой импульсов  $B$  и  $E$ , обусловленных первым ответвлением.

Проникшие в ответвления преломлённые

импульсы отражаются от концов ответвлений с сохранением полярности и вновь распространяются к концу магистрали, внося дополнительные импульсы  $DE$ ,  $BE$ ,  $VDE$  в рефлектомограмму, тем самым усложняя её вид и затрудняая анализ. Эти импульсы не считаются основными при расшифровке рефлектомограмм, так как расстояния, соответствующие этим импульсам, превышают длину линии. Но эти импульсы могут быть использованы как вспомогательные для проверки достоверности распознавания рефлектомограммы.

Импульс  $DE$  является суммой амплитуд двух импульсов, прошедших одинаковые расстояния, но разными путями:  $ABGDGEGBA$  и  $ABGEGDGBA$  с отражениями в точках  $D$  и  $E$ .

Импульс  $BE$  также является суммой амплитуд двух импульсов, прошедших одинаковые расстояния, но разными путями:  $ABBBGEGBA$  и  $ABGEGBBBA$  с отражениями в точках  $B$  и  $E$ .

Импульс  $VDE$  состоит из суммы амплитуд двух импульсов, прошедших одинаковые расстояния, но разными путями:  $ABBGDGEGBA$  и  $ABGEGDGBBA$  с отражениями в точках  $B$ ,  $D$  и  $E$ .

Достоверность идентификации импульсов  $DE$ ,  $BE$  и  $VDE$  проверяется суммированием участков линии известной длины, обозначенных на рис.11.

В статье рассмотрены примеры распознавания рефлексограмм проводящих структур весьма простой конфигурации. Анализ рефлексограмм более сложных древовидных структур будет представлен в последующих публикациях.

## Выводы

1. Зная характер возможных отражений, обусловленных неоднородностями линий с ответвлениями, можно однозначно расшифровывать рефлексограммы электролиний с древовидной топологией.

2. В лабораторных и полевых условиях исследованы импульсные реакции реальных неоднородностей кабельных и воздушных электролиний, каковыми являются КЗ и обрывы проводов, кабельные вставки, ответвления, обмотки трансформаторов. Определены закономерности в изменениях полярности и формы отражённых импульсов в зависимости от характера и значения неоднородностей [8, 9].

Выявленные диагностические признаки неоднородностей (словарь характерных отражённых импульсов) необходимы для распознавания рефлексограмм электролиний с древовидной топологией и с реальными видами нагрузок и неоднородностей, встречающихся на практике. Установленные диагностические признаки применимы также к связным и телекоммуникационным линиям.

*Исследования выполнены на средства фонда НИОКР ОАО "Татэнерго" за 2001 и 2004 гг., а также фонда НИОКР Республики Татарстан (грант Академии наук Республики Татарстан, проект 06-6.7-178/2002-2004-Ф).*

## Список литературы

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982.
2. Минуллин Р.Г. Методы и аппаратура определения мест повреждений в электросетях. Казань: ИЦ "Энергопрогресс", 2002.

3. Минуллин Р.Г. Методы и средства высокочастотной связи по линиям электропередачи. Казань: ООО "ИЦ "Энергопрогресс", 2004.

4. 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.

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

6. Фардиев И.Ш., Минуллин Р.Г., Закамский Е.В., Андреев В.В., Губаев Д.Ф. Диагностика воздушных линий распределительных электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2004. № 7–8. С. 41–49.

7. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. Основы теории цепей. М.: Энергоатомиздат, 1989.

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

9. Закамский Е.В. Локационный метод обнаружения повреждений в электрических распределительных сетях напряжением 6 – 35 кВ. Дисс....канд. техн. наук. Казань: КГЭУ, 2004.

**Минуллин Ренат Гизатуллович** – профессор кафедры электроэнергетических систем и сетей (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Окончил в 1959 г. радиотехнический факультет Казанского авиационного института. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Прогностическая радиофизическая модель среднеширотного спорадического слоя Е" в ИЗМИРАН.

**Фардиев Ильшат Шаехович** – соискатель кафедры ЭСиС КГЭУ. Окончил в 1984 г. электроэнергетический факультет МЭИ.

**Губаев Дамир Фатыхович** – соискатель кафедры ЭСиС. Окончил в 1984 г. электроэнергетический факультет МЭИ.

**Карпенко Олег Иванович** – соискатель кафедры ЭСиС. Окончил в 1985 г. самолётостроительный факультет Казанского авиационного института.

**Закамский Евгений Владимирович** – инженер ОАО "Татэнерго". Окончил в 1999 г. электроэнергетический факультет Казанского государственного энергетического университета. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Локационный метод обнаружения повреждений в электрических распределительных сетях напряжением 6 – 35 кВ" в КГЭУ.

# **Учёт изменения потерь холостого хода трансформаторов в период службы при расчёте потерь в распределительных сетях**

КАЗАКОВ Ю.Б., КОЗЛОВ А.Б., КОРОТКОВ В.В.

Рассматриваются причины изменения потерь ХХ трансформаторов в период эксплуатации. На основе статистических данных оцениваются значения этих изменений. Показана необходимость учёта реальных потерь ХХ трансформаторов при расчёте потерь в распределительных электрических сетях.

В Центрэнерго РАО "ЕЭС РОССИИ" эксплуатируются более 240 тыс. силовых трансформаторов разных уровней напряжения. Большое количество трансформаторов с длительным сроком службы. Около 70% трансформаторов эксплуатируются 20 лет и более, 30% – 30 лет и более. В эксплуатации находятся трансформаторы, проработавшие 40 и даже 50 лет. Стоимость одного силового трансформатора может достигать нескольких миллионов рублей. Экономическая ситуация не позволяет в ближайшие годы провести замену устаревшего оборудования.

Технические потери электроэнергии при её транспортировке в распределительных сетях являются основой норматива, определяющего экономически обоснованный технологический расход электроэнергии [1]. Занижение технических потерь приводит к снижению эффективности работы сетевого предприятия и уменьшению его дохода, завышение – к получению необоснованных доходов. Точная оценка потерь электроэнергии обеспечивает корректное определение эффективности работы сетевого предприятия и планирование энергосберегающих мероприятий.

В городских электрических сетях (ГЭС) значительной составляющей потерь электроэнергии (до 25–30%) являются потери ХХ трансформаторов  $P_{XX}$ . На пути к потребителю выполняется до 4–5 преобразований энергии в трансформаторах с выделением  $P_{XX}$ . При реформировании и структурных изменениях промышленности в распределительных сетях и между трансформаторами происходит перераспределение электроэнергии. Это при-

*Considered reasons of changing the losses of run idle of transformers at a period of the lifetime. On the base statistical given is valued value of these changes. Shown needs of account of real losses of run idle of transformers at the calculation of losses in distributing electrical networks.*

водит к снижению коэффициентов загрузки трансформаторов, что увеличивает долю потерь ХХ в суммарных потерях в трансформаторах. Обычно при расчётах баланса энергии потери  $P_{XX}$  принимаются равными паспортному значению  $P_{XX, \text{пасп}}$ . На практике паспортное значение  $P_{XX, \text{пасп}}$  не всегда соответствует реальным потерям в трансформаторе и для разных трансформаторов различие может быть значительным. Неточное задание  $P_{XX}$  приводит к существенной ошибке в расчётах отпуска электроэнергии. "Цена ошибки" возрастает с увеличением времени службы трансформаторов  $T_{\text{сл}}$ , мощности и числа трансформаторов в сети.

Уже для нового трансформатора потери ХХ могут оказаться выше паспортного значения, при этом трансформатор будет соответствовать предъявляемым к нему требованиям. Трансформаторы выпускаются по двум уровням допуска на потери ХХ. Для первого уровня допуск 25–630 кВ·А [2, 3] в конкретном трансформаторе может составлять до 115% потерь ХХ, указанных в паспорте заводом-изготовителем [4, 5]. Для второго уровня значение потерь ХХ может быть больше еще на 10%.

В процессе срока службы трансформатора  $P_{XX}$  не остаются неизменными. Их изменение может быть вызвано несколькими причинами.

При плохой изоляции листов стали в сердечнике появляется путь для замыкания вихревых токов между листами стали. Циркулирующие вихревые токи могут вызвать увеличение потерь ХХ на 10–30% [6–8].

При работе трансформатора в течение длительного времени ослабляется сжатие листов шихтованного сердечника стяжными шпильками или бандажами. Происходит частичная распрессовка сердечника трансформатора, появляются паразитные зазоры на пути замыкания потока взаимной индукции. В результате происходит увеличение до 10% тока ХХ трансформатора [7]. Одновременно растут потоки рассеяния, вызывающие повышение мощности потерь на путях замыкания этих потоков (в стали бака и других стальных конструктивных элементах – до 20%). Повышение потерь ХХ, соответствующее этим процессам, может достигать 5%.

Имеющие место в процессе работы трансформатора перегревы (из-за КЗ, ухудшения условий теплоотвода вследствие старения трансформаторного масла и др.) выше допустимых значений приводят к ухудшению магнитных свойств стали сердечника, увеличению тока ХХ и повышению  $P_{XX}$ , которое с течением времени может достигать 4% [4, 9, 10].

С ростом срока службы трансформатора происходит ухудшение диэлектрических свойств изоляции обмоток и выводов, трансформаторного масла за счёт: старения твердой изоляции; истирания твердой изоляции в условиях постоянных колебаний, деформаций в режимах КЗ и др., увлажнение и загрязнение поверхности твёрдой изоляции и трансформаторного масла и др. В результате происходит снижение сопротивления изоляции, возрастают токи утечки, увеличивается частота и мощность ЧР и, как следствие, повышаются диэлектрические потери (они могут достигать 10% полного значения потерь ХХ в высоковольтных трансформаторах [7]) и, соответственно, потери ХХ.

Свою долю в увеличение потерь ХХ вносит и работа трансформатора с несимметричной нагрузкой, в результате которой появляются магнитные потоки нулевой последова-

тельности и, как следствие, дополнительные потери ХХ.

В процессе эксплуатации трансформаторов важное значение имеет диагностический контроль параметров трансформаторов и, при необходимости, проведение плановых или внеплановых ремонтных работ. Необоснованное решение о проведении ремонта трансформатора, объёме и технологии в лучшем случае приводит к неоправданным затратам, в худшем – к снижению показателей и надёжности, а в итоге – к значительным материальным затратам [11]. Некачественная перешихтовка магнитопровода при ремонте трансформатора приводит к повышению потерь ХХ до 20% [7]. Замена стали сердечника другой маркой стали, например горячекатаной на холоднокатаную, приводит к изменению потерь в магнитопроводе в 2,5 раза, прямых стыков на косые – до 15% [4, 7]. Дополнительная механическая обработка листов электротехнической стали повышает потери в магнитопроводе на 5–10% [9]. Отжиг пластин стали снижает удельные потери в них до 15% [7], но одновременно ухудшает магнитные свойства электротехнической стали магнитопровода и повышает ток ХХ до 20% с ростом электрических потерь от него в первичной обмотке.

Существенно на изменение потерь ХХ трансформатора влияет изменение при ремонте обмоточных данных, изоляционных промежутков, замена трансформаторного масла и твердой изоляции обмоток и выводов. При изменении соотношения напряжения и числа витков в первичной обмотке изменяется магнитный поток в трансформаторе и пропорционально квадрату этого изменения изменяются потери ХХ.

Изменение  $P_{XX}$  с течением времени работы подтверждается результатами специальных измерений на 13 трансформаторах ТМ 250/10 Шуйской горэлектросети Ивановской

Таблица 1

Потери ХХ трансформаторов ТМ 250/10 Шуйской горэлектросети ( $P_{XX, \text{насп}} = 820 \text{ Вт}$ )

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$T_{\text{сл}}, \text{ лет}$	34	32	31	29	28	25	24	19	18	16	12	11	2
$P_{XX}, \text{ Вт}$	1140	998	902	998	909	999	841	619	798	798	959	879	519
$\Delta P_{XX}, \%$	39,0	21,7	10,0	21,7	10,9	21,8	2,56	-24,5	-2,7	-2,7	17,0	7,2	-36,7

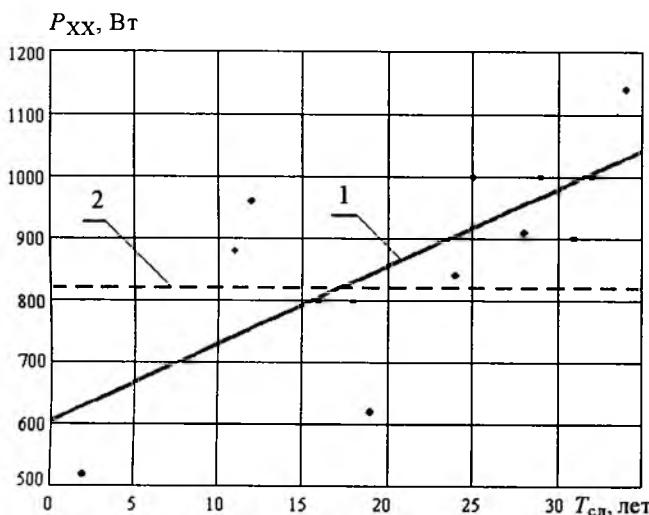


Рис.1. Зависимость изменения потерь ХХ трансформаторов ТМ 250/10 Шуйской горэлектросети от срока службы:

◆ – измерения; 1 – линейный тренд; 2 – паспортная мощность потерь ХХ

области со сроками службы от 2 до 34 лет [12]. Средний срок службы трансформаторов с высшим напряжением 10 кВ для приведённой выборки 21,6 года. Результаты измерений представлены в табл.1 и на рис.1.

Здесь  $\Delta P_{\text{XX}} = \frac{P_{\text{XX}} - P_{\text{XX,пасп}}}{P_{\text{XX,пасп}}} \cdot 100\%$  процент-

ное отличие реального значения потерь ХХ трансформатора от паспортного.

Максимальные потери ХХ выявлены у трансформатора с наиболее продолжительным сроком эксплуатации 34 года. Они более чем в 2,2 раза превышают потери ХХ самого "молодого" трансформатора и в 1,39 раза паспортные потери ХХ. Таким образом, изменение потерь ХХ трансформаторов в период срока службы, особенно подвергавшихся в этот период ремонтам, вполне может достигать 30–50%.

Для всей этой, не очень большой, выборки наблюдается рост  $P_{\text{XX}}$  с увеличением времени работы трансформатора. Линейный тренд, полученный при помощи табличного процессора Excel, показывает интенсивность роста 1,49% в год. Среднее значение  $P_{\text{XX}}$  по всем трансформаторам составляет  $1,07P_{\text{XX,пасп}}$ . Через 20 лет службы значение  $P_{\text{XX}}$  превышает  $P_{\text{XX,пасп}}$ . В среднем для шести трансформаторов со сроком службы менее 20 лет  $P_{\text{XX}} = 0,93P_{\text{XX,пасп}}$ . Средний срок эксплуата-

ции семи трансформаторов, работающих более 20 лет, достигает 29 лет. Возрастание  $P_{\text{XX}}$  этих трансформаторов составляет 2% в год. Таким образом, интенсивность роста  $P_{\text{XX}}$  может лежать в диапазоне 1,5–2%/год.

Эти данные показывают, что при расчётах норматива потерь распределительных сетей с высшим напряжением 6–10 кВ необходимо учитывать реальные, а не паспортные значения потерь ХХ трансформаторов, соответствующие сроку их эксплуатации. Для Шуйской ГЭС это может означать "добавку" к общему значению потерь 0,3–0,6% всей поставляемой энергии, а для сельских сетей – 0,5–1,0%. Очевидно, что такая существенная "добавка" к значению технических потерь не может игнорироваться.

Для более точного определения изменения  $P_{\text{XX}}$  в процессе эксплуатации трансформаторов целесообразно накопление и статистическая обработка большего фактического материала по результатам измерений. Для подтверждения полученных результатов был проведён анализ данных испытаний в 2004 г. 143 разных трансформаторов мощностью от 100–400 кВ·А и напряжением высшей обмотки 6–10 кВ от ГЭС другого города Ивановской области г. Вичуги. Диапазон сроков эксплуатации трансформаторов составил от 1 до 51 года. Средний срок службы трансформаторов 29 лет. Принимаем рубежный срок службы 20 лет. 24 трансформатора, что составляет 16,8% всех трансформаторов, эксплуатируются менее 20 лет. Среднее превышение срока эксплуатации остальных 119 трансформаторов над 20 годами составило 10,7 года.

С учётом различия паспортных потерь ХХ трансформаторов у разных типов трансформаторов  $P_{\text{XX,пасп}}$  в сравнении с ними анализировались реальные потери ХХ трансформаторов  $P_{\text{XX}}$ . В составе трансформаторов имелись трансформаторы с  $P_{\text{XX}}$  на 60% больше  $P_{\text{XX,пасп}}$ . Расчёты показали, что при учёте увеличения потерь ХХ трансформаторов в процессе эксплуатации реальные потери во всех 143 трансформаторах на 15,5% превышают расчётное значение, полученное при использовании паспортных данных. Для трансформаторов старше 20 лет это превышение составило 19%. Таким образом, средний рост  $P_{\text{XX}}$  всех трансформаторов ГЭС

г. Вичуги со сроком эксплуатации более 20 лет составляет 1,78 %/год.

Установлено, что потери ХХ, полученные с использованием паспортных данных трансформаторов, составляют 2,8% отпуска электроэнергии в ГЭС г. Вичуги. Реальное значение потерь ХХ трансформаторов составило 3,23% или на 0,43% больше расчётного.

Для более общей оценки проведена статистическая обработка фактического материала по результатам измерений потерь ХХ дополнительных 1323 трансформаторов мощностью 20–630 кВ·А распределительных сетей 6–10 кВ Ивановской области. На рис.2 приведены значения  $\Delta P_{XX}$  трансформаторов в зависимости от срока эксплуатации  $T_{сл}$ . При явно выраженной тенденции роста  $\Delta P_{XX}$  с изменением  $T_{сл}$  наблюдается достаточно большой разброс полученных значений. Рост  $\Delta P_{XX}$  (%) может быть представлен линейным трендом с уравнением

$$\Delta P_{XX} = -26,833 + 1,5553T_{сл}$$

при достоверности аппроксимации 0,229.

Если принять нелинейный характер зависимости, то можно сформировать квадратичный тренд с уравнением

$$\Delta P_{XX} = -15,171 + 0,576T_{сл} + 0,0175T_{сл}^2$$

при несколько большей достоверности аппроксимации: 0,235.

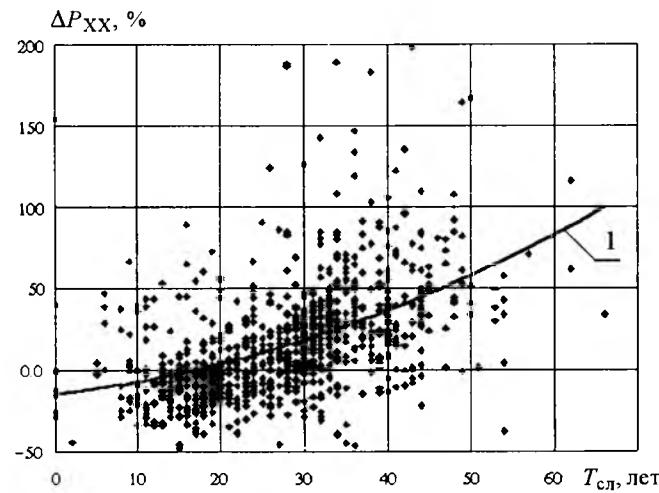


Рис.2. Изменение процентного отличия потерь ХХ 1323 трансформаторов мощностью 20–630 кВ·А распределительных сетей Ивановской области от паспортного значения в зависимости от срока эксплуатации:

◆ – измерения; 1 – квадратичный тренд

Решая полученные уравнения получаем, что в среднем потери ХХ трансформаторов достигают паспортного значения для линейного тренда при  $T_{сл} = 17,25$  года, а для квадратичного тренда при  $T_{сл} = 17,73$  года.

При использовании линейной зависимости интенсивность возрастания потерь ХХ трансформаторов в среднем составляет 1,56 % / год и при  $T_{сл} = 20$  лет  $\Delta P_{XX20}$  достигает +4,27%. Для квадратичной зависимости при небольших сроках эксплуатации трансформаторов нелинейность изменения потерь ХХ, определяемая коэффициентом 0,0175, проявляется несущественно и потери ХХ трансформаторов возрастают достаточно медленно: при  $T_{сл} = 10$  лет  $\Delta P_{XX10} = -7,65\%$ , при  $T_{сл} = 20$  лет  $\Delta P_{XX20} = +3,36\%$ . Далее потери возрастают более интенсивно.

Если бы сроки эксплуатации трансформаторов с учётом их мощностей равномерно распределялись по времени, то интеграл от полученной линии тренда соответствовал бы процентному различию суммарных выделенных потерь ХХ и паспортных в заданный промежуток времени. Так как в начале эксплуатации трансформаторов в среднем  $P_{XX} < P_{XX,пасп}$ , то с учётом дальнейшего роста  $P_{XX}$  с увеличением  $T_{сл}$  компенсация потерь при использовании в расчётах  $P_{XX,пасп}$  может наступить при некотором  $T_{сл} = T_{сл1}$ . Компенсация потерь происходит при  $T_{сл1} = 34,5$  года для линейного тренда и при  $T_{сл1} = 32$  года для квадратичного тренда. Но так как доля трансформаторов, эксплуатируемых менее 17,5 лет (без учёта их мощности), с точкой пересечения трендом линии  $\Delta P_{XX} = 0$  не превышает 15%, а число трансформаторов, эксплуатируемых 17,5–33 года, достигает 50–55%, то  $T_{сл1}$  становится близким к 20 годам.

Таким образом можно считать, что для трансформаторов всех типов со сроком службы до 20 лет зависимости  $\Delta P_{XX} = f(T_{сл})$  достаточно слабы и можно принимать  $\Delta P_{XX} = P_{XX,пасп}$  с точностью  $-8 \div +3\%$ .

Для облегчения применения математических зависимостей для трансформаторов "старше" 20 лет, с учётом их слабой нелинейности и использования на начальном этапе эксплуатации трансформаторов  $P_{XX,пасп}$ , изменение потерь ХХ разных типов трансформаторов рассматриваемой выборки может быть охарактеризовано линейной зависимостью

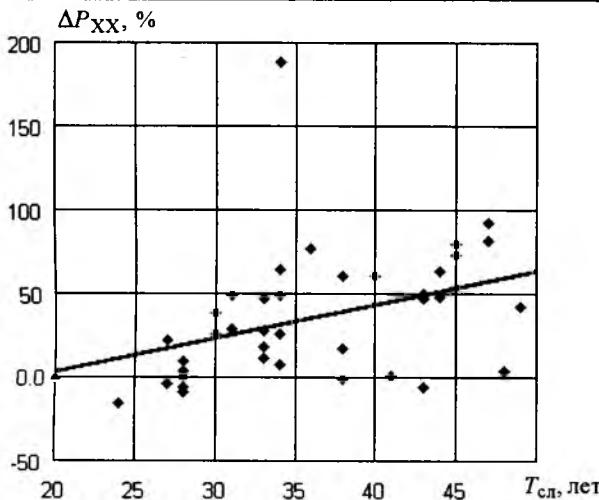


Рис.3. Изменение  $\Delta P_{XX}$  трансформаторов ТМ-100/6 Ивановской области "старше" 20 лет в зависимости от срока эксплуатации

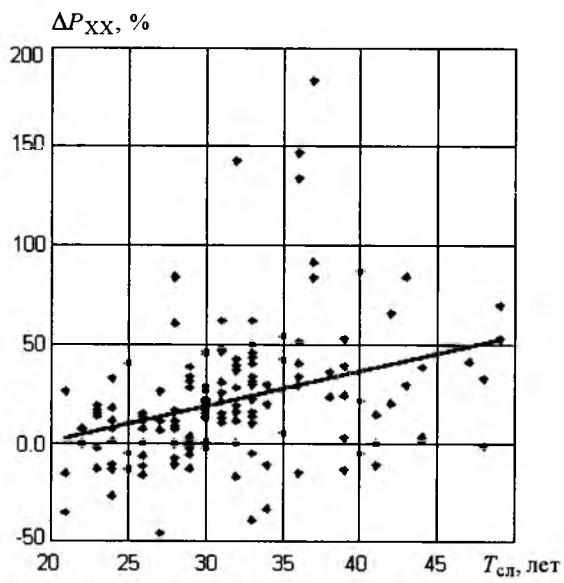


Рис.4. Изменение  $\Delta P_{XX}$  трансформаторов ТМ-100/10 Ивановской области "старше" 20 лет в зависимости от срока эксплуатации

$\Delta P_{XX} = A + BT_{sl}$  (рис.3, 4) с коэффициентами уравнения, приведёнными в табл.2.

Постоянные члены полученных соотношений (первые коэффициенты  $A$ ) для трансформаторов разных типов находятся в диапазоне  $+3 \div -9,7\%$ , среднее для всех типов  $-1,73\%$ , и показывают  $\Delta P_{XX}$  трансформаторов на момент срока службы  $T_{sl} = 20$  лет, т.е. на этот момент  $P_{XX}$  достаточно близко к  $P_{XX, \text{пасп}}$ . Второй коэффициент  $B$  при линейном члене уравнения лежит в диапазоне  $1,56 \div 2,01\%$ , среднее значение для всех типов трансфор-

Таблица 2

Линейные уравнения зависимости  $\Delta P_{XX}$  от срока службы трансформаторов разных типов "старше" 20 лет

Номинальная мощность, кВ·А/номинальное высшее напряжение, кВ трансформаторов	Число трансформаторов в выборке	Уравнения
100/6	367	$+3 + 2,01(T_{sl} - 20)$
100/10	243	$-0,18 + 1,8(T_{sl} - 20)$
160/6	37	$-9,7 + 1,56(T_{sl} - 20)$
160/10	151	$-7 + 1,71(T_{sl} - 20)$
250/10	162	$-5,6 + 1,7(T_{sl} - 20)$
400/10	42	$-1,53 + 1,76(T_{sl} - 20)$
По трансформаторам всех типов	1002	$-1,73 + 1,75(T_{sl} - 20)$

маторов  $1,75\%$ , указывает на процентное возрастание потерь ХХ в год.

#### Выводы

1. Статистические данные испытаний трансформаторов распределительных сетей показали существенное возрастание потерь ХХ трансформаторов с течением срока службы.

2. Для трансформаторов со сроком службы до 20 лет в среднем допустимо, с погрешностью до 8%, принимать потери ХХ равными паспортным. Для трансформаторов со сроком службы более 20 лет потери ХХ возрастают в среднем с интенсивностью  $1,75\%$  в год.

3. При расчёте потерь в распределительных электрических сетях необходимо учитывать реальные потери ХХ трансформаторов.

#### Список литературы

1. Воротницкий В.Э. Измерение, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. Проблемы и пути решения // Материалы международного семинара "Нормирование, анализ и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях." 2002.

2. ГОСТ 12022-76, ГОСТ 11920-85. Трансформаторы трехфазные силовые масляные общего назначения мощностью от 25 до 630 кВ·А на напряжение до 35 кВ включительно. Технические условия.

3. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.

4. Сергеевков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины: Трансформаторы. М.: Высшая школа, 1989.

5. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов. М.: Издательский центр "Академия", 2003.

6. Пиотровский Л.М., Васютинский С.Б., Нестровова Е.Д. Испытание электрических машин. Ч.2. Трансформаторы и асинхронные машины. Л.: ГЭИ, 1960.
7. Алексеенко Г.В., Ашрятов А.К., Веремей Е.А., Фрид Е.С. Испытание мощных трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1978.
8. Каганович Е.А., Райхлин И.М. Испытание трансформаторов мощностью до 6300 кВ.А и напряжением до 35 кВ. М.: Энергия, 1980.
9. Холоднокатаные электротехнические стали: Справочник. М.: Металлургия, 1989.
10. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
11. Худяков З.И. Ремонт трансформаторов. М.: Высшая школа, 1986.
13. Казаков Ю.Б., Коротков В.В., Чирков В.А. Изменение мощности потерь XX трансформаторов распределительных сетей 6–10 кВ в процессе эксплуатации // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 24. Современные методы и технические средства оценки состояния опорно-стержневых, подвесных и аппаратных изоляционных конструкций. СПб.: ПЭИПК, 2004. С. 124–129.

**Казаков Юрий Борисович** – профессор кафедры электромеханики Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ), доктор техн. наук. В 1976 г. окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института (ИЭИ). В 2000 г. в МЭИ защитил докторскую диссертацию по теме "Численное моделирование и разработка конструкций электрических машин с учётом взаимного влияния физических полей".

**Козлов Александр Борисович** – начальник сектора ИЗП ОАО "Извэнерго". В 1972 г. окончил электротехнический факультет Красноярского политехнического института.

**Коротков Владимир Васильевич** – главный инженер ОГУП "Ивановский центр энергосбережения", канд. техн. наук. В 1975 г. окончил электроэнергетический факультет ИЭИ. В 1980 г. в ЛПИ защитил диссертацию по теме "Исследование электрических характеристик аппаратов высших классов напряжения на лабораторных моделях".

# Исследование напряжений на элементах входного фильтра при воздействии импульса перенапряжения с крутым фронтом

ОРЛОВ Ю.А., СОРИН Л.Н.

Изложены результаты исследований напряжений на элементах входного фильтра ЭПС постоянного тока напряжением 3 кВ с тяговым асинхронным приводом при воздействии на входе импульса перенапряжения с крутым фронтом. Приведены зависимости напряжения на конденсаторах фильтра от параметров импульса, фильтра и коэффициента модуляции при регулировании напряжения статора асинхронного двигателя методом синусоидальной ШИМ. Обосновано применение схемы замещения реактора входного фильтра при воздействии импульса перенапряжений. Даны рекомендации по защите от перенапряжений.

Для обеспечения надёжной работы преобразовательного оборудования электроподвижного состава необходимо исключить воздействие на него опасных перенапряжений, превышающих расчётный уровень. За расчётный уровень, в пределах которого должны быть ограничены перенапряжения, принимается номинальное напряжение  $U_n$  используемых в преобразователях полупроводниковых приборов.

*This paper presents the investigation results of voltages on the input filter components of the d.c. 3 kV electric vehicle with asynchronous motor drive effected by the surge pulse with steep front on the input. Dependences of the voltage across the filter capacitors on pulse parameter filter and modulation factor are given for regulation of the asynchronous motor stator voltage by the sinusoidal PWM. The application of the equivalent circuit for the input filter reactor effected by the surge pulse is proved. The recommendations for over voltage protection are given.*

В настоящее время в некоторых литературных источниках [1,2] появились сведения о возможности применения IGBT-транзисторов на напряжение 6500 В в двухточечных схемах автономных инверторов напряжения (АИН) для сети с  $U_n = 3$  кВ. При расчётах загрузки силовых полупроводниковых приборов (СПП) коэффициент загрузки по напряжению принимается равным 0,35–0,45 [3]. Следовательно, класс прибора (или плеча) по

напряжению должен выбираться на напряжение более 8 кВ.

Перенапряжения, действующие на оборудование ЭПС, делятся на атмосферные и внутренние [4]. Атмосферные перенапряжения имеют длительность порядка нескольких десятков микросекунд. Внутренние (коммутационные и резонансные) перенапряжения могут иметь длительности до 20 мс.

Наибольшую опасность для СПП представляют внутренние импульсы перенапряжений, возникающие в контактной сети и передающиеся через ограничители перенапряжений (ОПН) на оборудование электровоза, в частности, на входной фильтр и далее на СПП.

Известно, что входной фильтр преобразователя образует колебательный контур.

Напряжение на конденсаторе зависит от параметров этого контура, в первую очередь, от декремента затухания  $\alpha = R/2L$ , где  $R$  – активное сопротивление контура,  $L$  – индуктивность контура. В тех случаях, когда собственная частота контура  $\omega_0$  намного превышает декремент затухания  $\alpha$ , что имеет место в схемах фильтра ЭПС, кратность перенапряжений возрастает. При  $R \rightarrow 0$  обычное включение колебательного контура на постоянное напряжение сопровождается перенапряжениями, почти вдвое большими номинального напряжения [5]. Обычно для исключения подобных перенапряжений параметры  $R$ ,  $L$  и  $C$  фильтра выбираются такими, чтобы заряд конденсатора был апериодическим и установившееся напряжение на нем не превышало входное напряжение.

Однако в момент подачи на фильтр коммутационного импульса, имеющего крутой фронт нарастания, параметры контура изменяются. В частности, сопротивление реактора из-за явления поверхностного эффекта значительно возрастает [5], большое влияние оказывают межвитковая ёмкость и ёмкость между витками и сердечником (витками и землей), зависящие от конструкции реактора. Параметры конденсаторов фильтра при этом тоже могут изменяться таким образом, что процесс их заряда становится колебательным. Максимальное напряжение на конденсаторах при этом увеличивается.

Существенное влияние на значение возникающих в колебательном контуре перенап-

ряжений оказывает форма и длительность воздействующего импульса [6]. При коротких быстро затухающих импульсах значение перенапряжений заметно ниже, и при определенных длительностях импульс поглощается реактором. При прямоугольной волне [6], большой собственной частоте контура и больших длительностях импульса кратность перенапряжения может достигать 1,7.

Международный союз железных дорог (МСЖД) нормирует перенапряжения, возникающие в контактной сети. На рис.1 приведены предельные значения напряжения в функции времени для сети постоянного тока напряжением 3 кВ [7].

Из рис. 1 видно, что значения перенапряжений, возникающих в контактной сети, т.е. на токоприемнике электровоза, при длительностях 1–10 мс могут превышать 10 кВ. Исследования внутренних коммутационных перенапряжений, возникающих в силовом оборудовании электровоза, проведённые в ОАО "ВЭлНИИ" показали, что они имеют меньшую амплитуду, чем внешние. Поэтому в дальнейшем рассматриваются только внешние перенапряжения.

Параметры входного реактора и конденсаторов фильтра при воздействии импульсов перенапряжений зависят от параметров самого импульса и конструктивных особенностей реакторов и конденсаторов. Исследование воздействия импульсов входных перенапряжений на электромагнитные процессы, происходящие на индуктивности и ёмкости входного фильтра, проведены на математической модели, описанной в [8]. Параметры электрооборудования после фильтра оставлены без

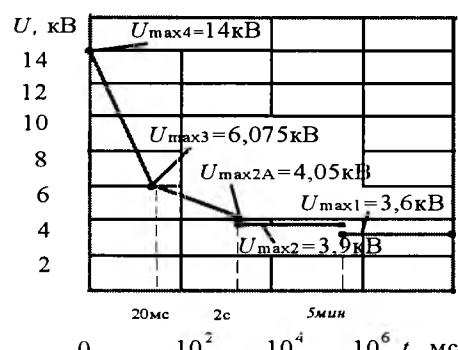


Рис.1. Предельные значения напряжения в функции времени для сети постоянного тока напряжением 3000 В

изменения. Схема АИН – трёхточечная, т.е. входной фильтр разделён на две равные половины. К полупроводниковым приборам АИН прикладывается половинное напряжение конденсаторов фильтра. Модель идентифицирована по результатам испытаний на полно масштабном стенде тягового привода электровоза НПМ2 (разработка ОАО "ВЭлНИИ").

Стандартные схемы замещения конденсаторов и реакторов [9,10] приведены для установленных режимов. Для режимов действия импульсов перенапряжений с крутым фронтом такие схемы отсутствуют.

Схема замещения конденсатора и её параметры представлены разработчиком применяемых в схемах входных фильтров конденсаторов типа К75-80 .

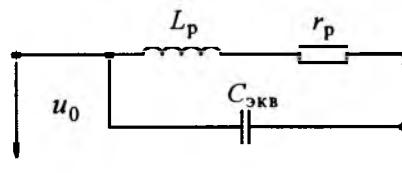
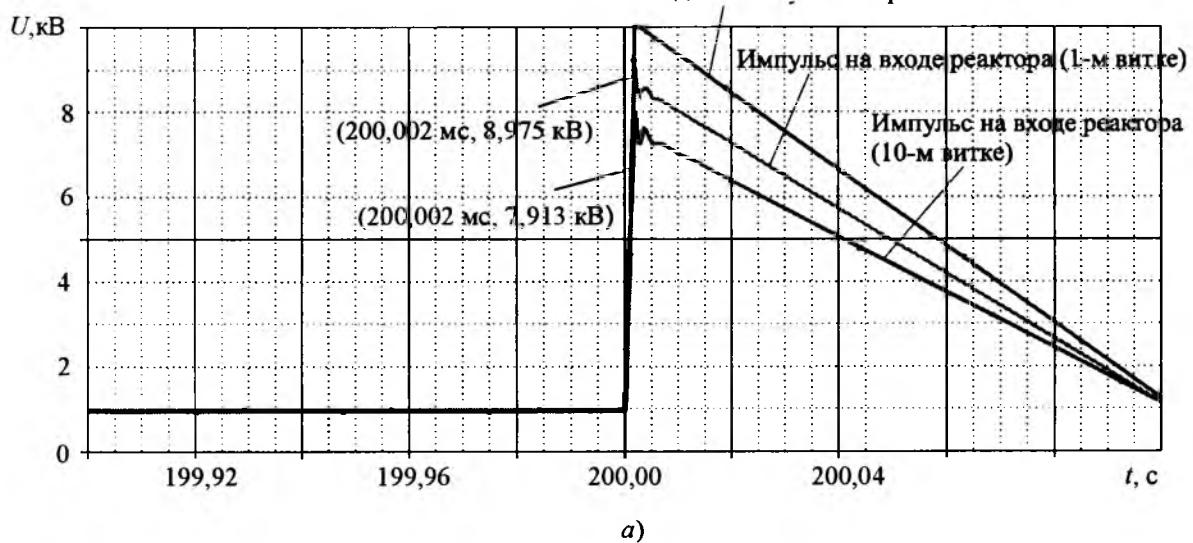
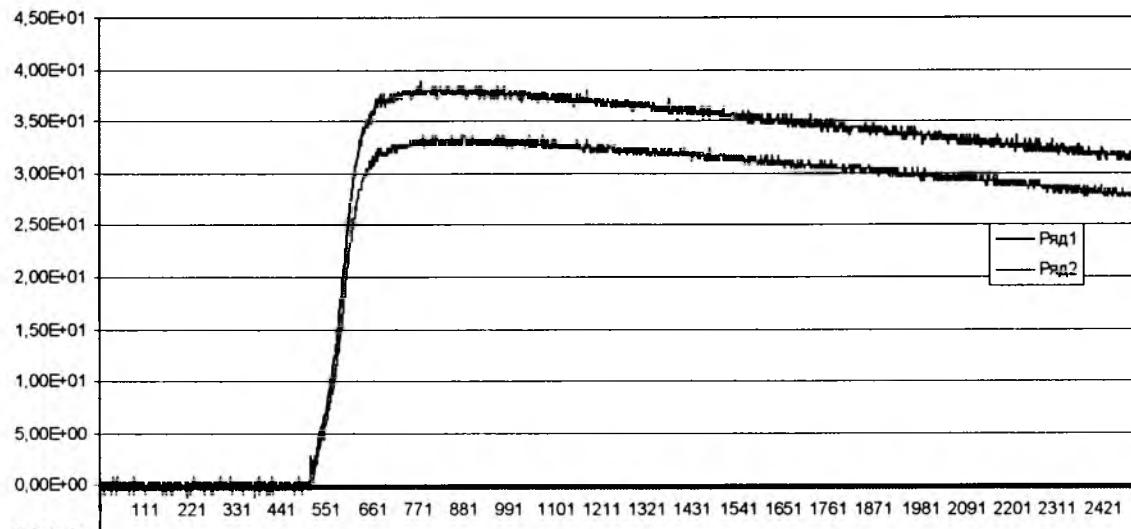


Рис.2. Схема замещения реактора ( $u_0$  – напряжение на входе;  $L_p$ ,  $r_p$  – индуктивность и сопротивление реактора, соответственно;  $C_{\text{экв}}$  – эквивалентная ёмкость)

Схема замещения реактора при воздействии на него крутого импульса перенапряжения описана в [11] и представлена на рис.2.



*a)*



*б)*

Рис.3. Осциллографмы распределения напряжения между витками:

*а* – на математической модели; *б* – экспериментально (вверху 1-й виток, внизу 10-й виток)

Вологодская областная универсальная научная библиотека

Эквивалентная ёмкость находится по формуле

$$C_{\text{экв}} = \frac{C_b}{N} + \frac{C_c(N+1)(N+2)}{12N},$$

где  $C_b$  – ёмкость между витками катушки реактора;  $C_c$  – ёмкость между витком и сердечником;  $N$  – количество витков катушки реактора.

Для проверки адекватности схемы замещения реактора на стенде ОАО "ВЭлНИИ" проведены специальные исследования.

На вход реактора типа ИШ 727 (разработка "ОАО ВЭлНИИ") с параметрами:  $U_{\text{ном}} = 3000$  В,  $I_{\text{ном}} = 650$  А,  $L_{\text{ном}} = 3,1$  мГн,  $r = 0,0045$  Ом подавался стандартный импульс с фронтом 1 мкс, длительностью 50 мкс, напряжением  $u_0 = 7,6$  кВ.

На рис.3,а приведены осциллограммы распределения напряжения между витками, полученные с помощью математической модели. На рис.3,б – те же осциллограммы, полученные экспериментально.

Результаты обработки распределения напряжения на витках обмотки представлены на рис.4, из которого видно, что перенапряжение  $U_{\text{пер}}$  уменьшается пропорционально расстоянию удаления от начала катушки (увеличение количества витков) и описывается формулой, полученной с помощью математической программы "Table curve"

$$U_{\text{пер}} = 7638 - 108N,$$

где  $N$  – количество витков.

Данная схема замещения реактора использована при исследованиях на математической модели влияния параметров импульса перенапряжений на входе на значения напряжений на входном реакторе, конденсаторах фильтра и полупроводниковых приборах.

Согласно исследованиям, проведённым во ВНИИЖТ, максимальное остающееся напряжение на ограничителе перенапряжений типа ОПН 3,3 при воздействии на него импульса перенапряжений, возникающего при срабатывании автоматических выключателей подстанции типа АВ-2/4 при отключении ими КЗ на выходе полупроводникового выпрямителя подстанции типа ПВЭ-3, достигало 8,7 кВ. Длительность импульса протекания тока КЗ около 20 мс. По данным разработчика ОПН при имеющемся разбросе характеристик ог-

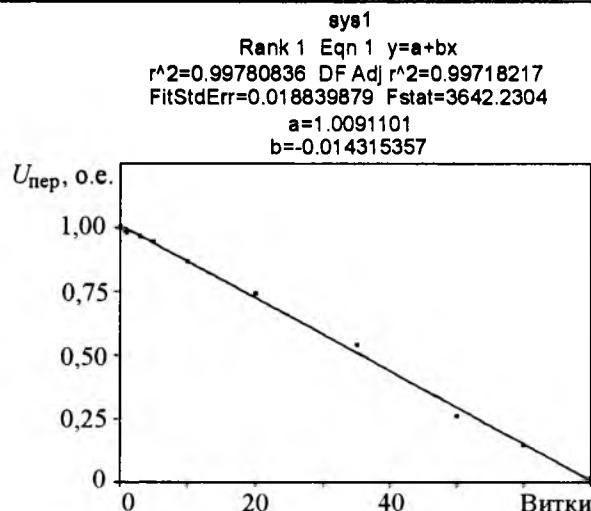


Рис.4. Результаты обработки распределения напряжения на витках обмотки

раничителей и температуре окружающей среды  $+60^{\circ}\text{C}$  максимальное остающееся напряжение ограничителя может достигать 10 кВ. Это не противоречит данным Международного союза железных дорог (МСЖД), который нормирует перенапряжения, могущие возникать в контактной сети (рис.1).

На рис.5 приведена осциллограмма импульса перенапряжений, остающегося после ОПН на входе преобразователя, на котором нанесены значения токов и напряжений. Пунктиром показан смоделированный импульс перенапряжения.

Исследования на модели проведены для разных параметров фильтра: ёмкость фильтра  $C_{\phi} = 1 \div 50$  мФ; индуктивность фильтра  $L_{\phi} = 0,5 \div 25$  мГн, амплитуды входного импульса перенапряжения  $U_{\text{имп}} = 5 \div 10$  кВ; длительности импульса  $t_{\text{и}} = 1 \text{ мкс} \div 50 \text{ мс}$ , ско-

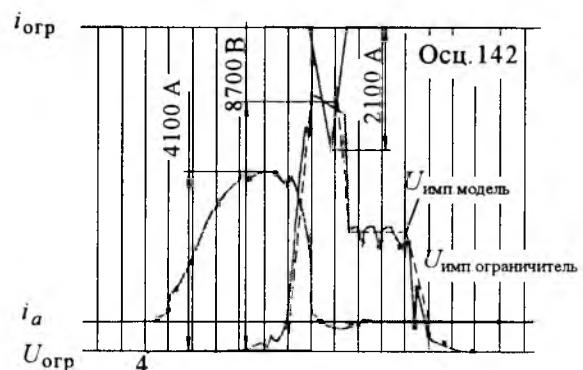


Рис.5. Осциллограмма импульса напряжений, остающегося после ОПН 3,3

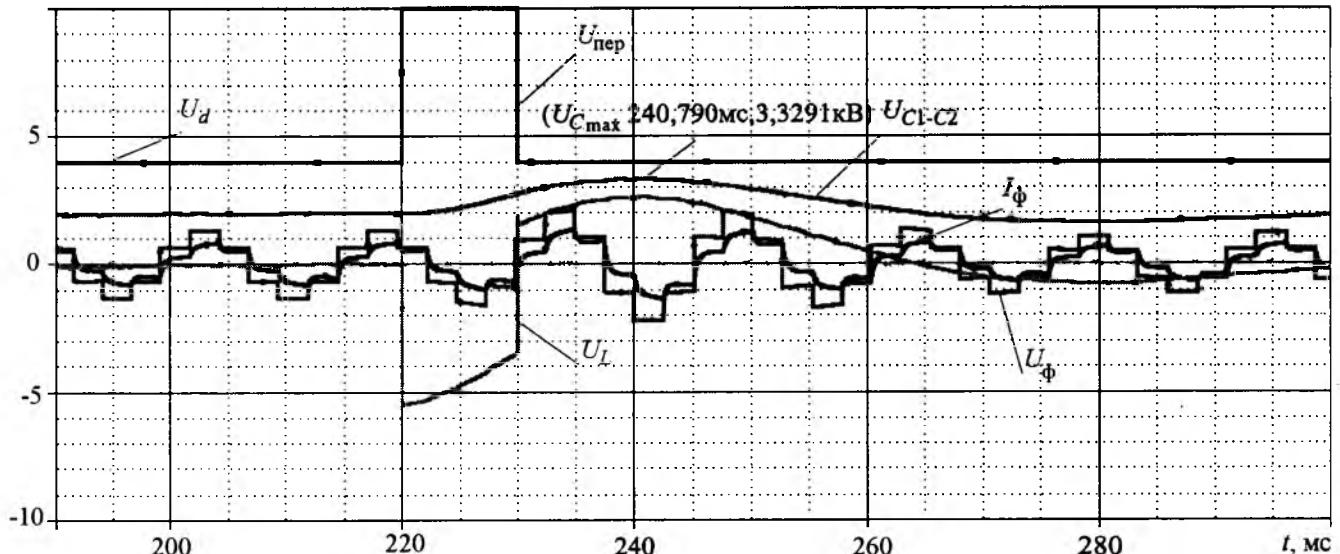
$U$ , кВ

Рис.6. Осциллограммы токов и напряжений на элементах входного фильтра при воздействии прямоугольного импульса перенапряжений в номинальном режиме

рости нарастания напряжения фронта импульса  $du/dt = 1000 \div 10000$  В/мкс.

Наибольший интерес представляет исследование зависимости напряжения на конденсаторах фильтра от его параметров  $C_{\Phi}$  и  $L_{\Phi}$ . Согласно [12] пассивные фильтры выбираются на резонансные частоты  $f_{\text{рез}} < 21$  Гц, гибридные фильтры на частоты в диапазоне 65–100 Гц. Рациональная несущая частота переключения IGBT-транзисторов, используемых в АИН, находится в диапазоне 750–1000 Гц. Исследования показали, что импульсы длительностью менее 1 мкс не проходят через реактор. Наибольшее напряжение на конденсаторах фильтра наблюдается при воздействии длинных импульсов более 10 мс.

В качестве примера на рис.6 приведены осциллограммы токов и напряжений на элементах входного фильтра при воздействии прямоугольного импульса перенапряжений в номинальном режиме при  $f_{\text{рез}} = 14,5$  Гц,  $L_{\Phi} = 24$  мГн,  $C_{\Phi} = 5,5$  мФ,  $t_{\text{имп}} = 10$  мс). На рис.6 принято:  $U_d$  – напряжение на входе;  $U_{\text{пер}}$  – импульс перенапряжения;  $U_{C1-C2}$  – напряжение на половине входного фильтра трёхточечного АИН;  $U_{\Phi}$  – фазное напряжение;  $I_{\Phi}$  – фазный ток.

Анализ результатов исследований показал, что напряжение на конденсаторах фильтра незначительно зависит от параметров  $L$  и  $C$  внутри диапазона определенной резонансной частоты (подкоренное выражение  $LC = \text{const}$ )

и сильно зависит от самой резонансной частоты.

На рис.7 приведены зависимости максимального напряжения на конденсаторах фильтра от индуктивности реактора при разных резонансных частотах.

На рис.8 показана зависимость максимального напряжения на конденсаторах фильтра от резонансной частоты, из которой видно, что с ростом частоты до определённого предела максимальное напряжение на конденсаторах фильтра растёт примерно до  $1,8 U_{\text{пер}}$ .

Известно, что напряжение на конденсаторе увеличивается пропорционально энергии импульса. При заданных амплитудах напря-

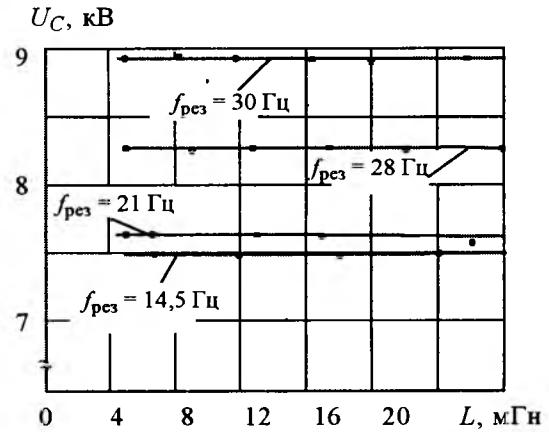


Рис.7. Зависимости максимального напряжения на конденсаторах фильтра от индуктивности реактора при разных резонансных частотах

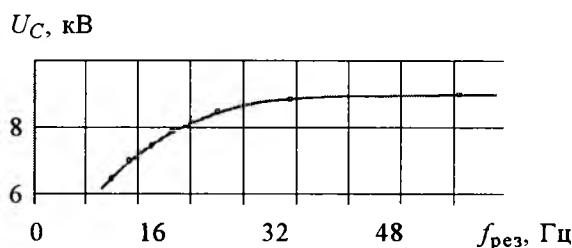


Рис.8. Зависимость максимального напряжения на конденсаторах фильтра от резонансной частоты

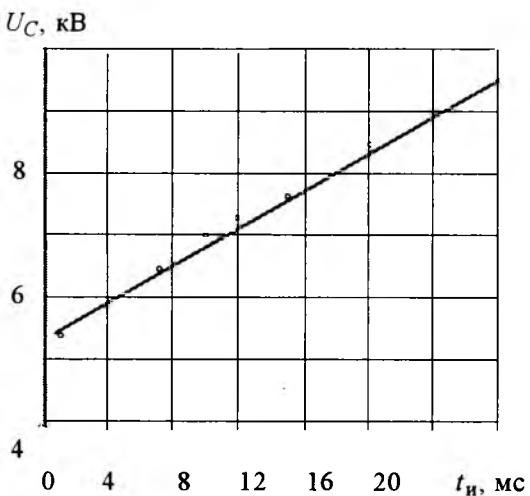


Рис.9. Зависимость перенапряжения на конденсаторах фильтра от длительности импульса

жения и тока импульса легче определить зависимости напряжения на конденсаторах фильтра  $U_C$  от длительности импульса. Исследование зависимости напряжения  $U_C$  от длительности импульса перенапряжения  $t_i$  проведены при  $du/dt = 10$  кВ/мкс,  $U_{\text{имп}}=10$  кВ,  $L=24$  мГн,  $C_{\phi}=5,5$  мФ и  $f_{\text{рез}}=14$  Гц,  $R_{\text{зар}}=20$  Ом,  $t_i = 1 \div 20$  мс. Зависимость  $U_C = f(t_i)$  приве-

дена на рис.9. Из рис.9 следует, что напряжение увеличивается пропорционально длительности импульса по формуле, аппроксимированной с помощью математической программы "Table curve"

$$U_C = 5,2 - 0,155t_i.$$

Анализ данных исследований показал, что крутизна фронта импульса перенапряжений не влияет на значение напряжения на конденсаторах.

Из исследований, проведенных в [13], известно, что в режимах широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на конденсаторах фильтра имеются значительные пульсации, которые увеличивают напряжение на конденсаторах. При этом значение напряжения зависит от коэффициента модуляции и не зависит от частоты выходного напряжения инвертора. В качестве примера на рис.10 приведены осцилограммы напряжений, характеризующие электромагнитные процессы в режиме ШИМ. В данном режиме частота напряжения статора  $f_{\text{ст}} = 20$  Гц, несущая частота  $f_{\text{нес}} = 720$  Гц, коэффициент модуляции  $K_m = 0,35$ ,  $t_i = 20$  мс,  $du/dt = 3000$  В/мкс. Параметры входного фильтра  $L_{\phi} = 24$  мГн,  $C_{\phi} = 5,5$  мФ. Так как в рассматриваемой схеме применён преобразователь, построенный по трёхточечной схеме, то напряжение на конденсаторе приведено для половины фильтра. Обозначения на рис.10 аналогичны обозначениям на рис.6.

Исследования показали, что при неизменной несущей частоте напряжение на конденсаторах фильтра зависит от коэффициента модуляции  $K_m$ . На рис.11 приведены данные исследований зависимости напряжения на

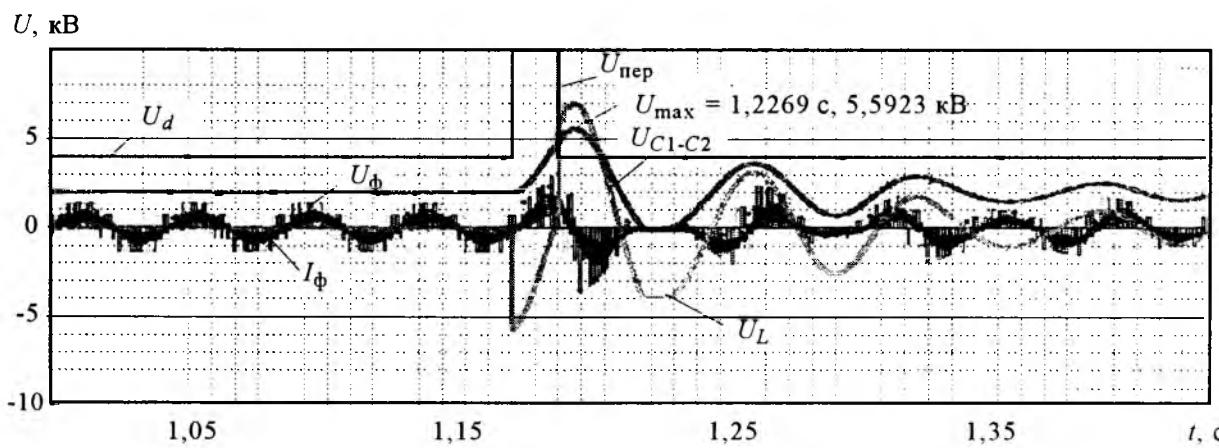


Рис.10. Осцилограммы напряжений на элементах электрооборудования в режиме ШИМ при частоте напряжения статора 20 Гц

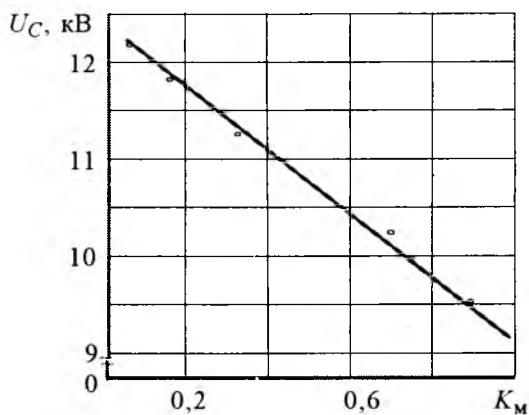


Рис.11. Зависимость напряжения на конденсаторах фильтра от коэффициента модуляции при регулировании напряжения методом ШИМ

конденсаторах фильтра от коэффициента модуляции, определяющейся формулой

$$U_C = 12,3 - 3,1K_m$$

Как показал анализ, скорость нарастания напряжения на конденсаторах фильтра невелика и составляет примерно 1–10 В/мкс. Даже в режиме с индуктивностью, близкой к нулю,  $du/dt$  не превышает 15 В/мкс.

Таким образом, проведённые исследования показали, что напряжение на конденсаторах фильтра зависит от резонансной частоты, длительности импульса, а в режиме ШИМ еще и от коэффициента модуляции. Наиболее опасным по перенапряжениям на конденсаторах входного фильтра, которые далее прикладываются к полупроводниковым приборам, является режим ШИМ. Максимальное напряжение на конденсаторах фильтра может достигать 12 кВ. Скорость нарастания напряжения во всех режимах не превышает 15 В/мкс, что позволяет использовать защиту от перенапряжений с применением обычных отечественных датчиков напряжений типа ТВЕЛЭМ со временем срабатывания примерно 100 мкс.

#### Список литературы

1. Ласка Б. Развитие тяговых преобразователей на транзисторах IGBT // Железные дороги мира. 2003. №11. С. 32–39.

2. Бакран М.М. Применение тяговых преобразователей на базе транзисторов IGBT // Железные дороги мира. 2002. №5. С. 34–38.

3. Абрамович М.И., Бабайлов В.М., Либер В.Е. и др. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. М.: Энергоатомиздат, 1992.

4. Долгинов А.И. Техника высоких. 1968.

5. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Теория нелинейных электрических и магнитных цепей. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1975.

6. Радченко В.Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. М.: Транспорт, 1975.

7. Электрическая тяга поездов от контактного провода. Нормлист 600 Кодекса Международного союза железных дорог (МСЖД). 11.01.1995.

8. Бахвалов Ю.А., Зарифьян А.А., Кашников В.Н. и др. Моделирование электромеханической системы электропоезда с асинхронным тяговым приводом. М.: Транспорт, 2001.

9. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981.

10. Ермуратский В.В., Ермуратский П.В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. М.: Энергия, 1979.

11. Бахвалов Ю.А., Сорин Л.Н., Орлов Ю.А. Модель электромагнитных процессов и схемы замещения реактора для расчёта процессов при воздействии импульса перенапряжений с крутым фронтом. // Изв. вузов. Электромеханика. 2005. №3. С.54–59.

12. Сорин Л.Н., Лещев А.И., Литовченко В.В. и др. Оценка эффективности пассивных и активных фильтров для статических преобразователей электроподвижного состава // Изв. вузов. Электромеханика. 2003. № 1. С.61–68.

13. Сорин Л.Н. Исследование пульсаций напряжения на емкости входного фильтра электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями // Изв. вузов. Электромеханика. 2003. № 4. С.51–56.



Орлов Юрий Алексеевич – директор по опытно-конструкторским работам ОАО "ВЭЛНИИ". Окончил электромеханический факультет Новочеркасского политехнического института в 1987 г.



Сорин Леонид Наумович – генеральный директор ОАО "ВЭЛНИИ", канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет Новочеркасского политехнического института в 1977 г. по специальности "Электрические машины и аппараты". Защитил диссертацию по теме "Синтез частотно-регулируемых асинхронных тяговых двигателей для электровозов" в 1983 г.

## **Частотно-регулируемые электроприводы тягодутьевых и насосных механизмов котельных на базе преобразователей частоты АТ корпорации "Триол"**

**ХЕЧУЕВ Ю.Д., КАЛАШНИКОВ Б.Е., ОЛЬШЕВСКИЙ В.И.**

При строительстве котельных, основной функцией которых является создание нормальных жизненных условий населения, специалисты должны обеспечить: с одной стороны, минимальные стоимости котельной и применяемого оборудования, с другой, эксплуатационные характеристики котельной в экстремальных условиях, т.е. при пиковых отрицательных температурах воздуха. Кроме того, объект должен надёжно работать при аварийных ситуациях.

Первое требование предполагает использование типовых решений с незначительными доработками. Критерием выбора решения является выбор такой мощности, которую диктует второе требование – обеспечение "пиковых" режимов и надёжная работа оборудования.

Таким образом, производительность котельной для продолжительных режимов работы оказывается значительно завышенной. Задача согласования мощностей решается отключением отдельных котлов, а точная настройка – снижением производительности оставшихся. Подавляющее число эксплуатируемых систем управления производительностью котельных предполагает воздействие на запорно-регулирующие аппараты трубопроводов и газовоздуховодов (различные задвижки, направляющие аппараты и т. п.) при неизменной частоте вращения асинхронных двигателей (дроссельное регулирование).

Известно, что энергетическая эффективность этого вида регулирования чрезвычайно низка и чем более глубоко осуществляется процесс регулирования, тем более непроизводительна затрата мощности. Распространение данного вида управления производительностью котельных связано с отсутствием

ем в момент строительства эффективных устройств управления частотой вращения асинхронных машин.

Корпорация "Триол" разработала, производит и широко внедряет современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы серии АТ и основанные на них системы автоматического управления механизмами котельных установок типа "Умный Факел".

Применение электроприводов "Триол" АТ и системы "Умный Факел" даёт возможность достаточно просто адаптировать универсальный электропривод к конкретному объекту, имеющему свои специфические требования.

Все механизмы котельной, приводимые в движение асинхронными двигателями, можно разбить на две группы:

1. Механизмы, непосредственно участвующие в технологическом цикле:

- тягодутьевые механизмы (вентиляторы, дымососы);
- насосы (сетевые, подпиточные, рециркуляционные, мазутные).

2. Механизмы вспомогательного оборудования котельной.

Механизмы первой группы – это механизмы непрерывного действия, а второй – циклического.

Наибольший эффект от применения управляемых электроприводов дают именно механизмы непрерывного действия, так как с изменением производительности котельной установки тем или иным способом приходится ограничивать их производительность.

### **Улучшение энергетических показателей котельной установки**

Встроенная микропроцессорная система управления электропривода наилучшим обра-

зом позволяет реализовать оптимальные режимы работы котельной во всем диапазоне её производительности. Развитое программное обеспечение, адаптированное непосредственно к данному объекту управления, легко позволяет учитывать возмущающие факторы, ухудшающие режим горения в топке котла и вводить соответствующие корректирующие поправки.

### Уменьшение потребления электроэнергии

Электродвигатели с центробежными механизмами на валу не потребляют из питающей сети дополнительную мощность, расходуемую на создание избыточного давления перед различными дроссельными заслонками и на преодоление их сопротивления.

### Увеличение срока службы приводных механизмов

В момент пуска электропривода отсутствуют динамические нагрузки на приводные механизмы и гидравлические удары в трубопроводах, так как ввод в работу осуществляется плавно, практически с нулевой скорости и с заданным темпом увеличивается до необходимой.

### Увеличение срока службы контактно-коммутационной аппаратуры

При пуске электропривода отсутствуют броски тока, связанные с прямым включением двигателя в сеть. Значения пусковых токов электропривода не превышают номинальных.

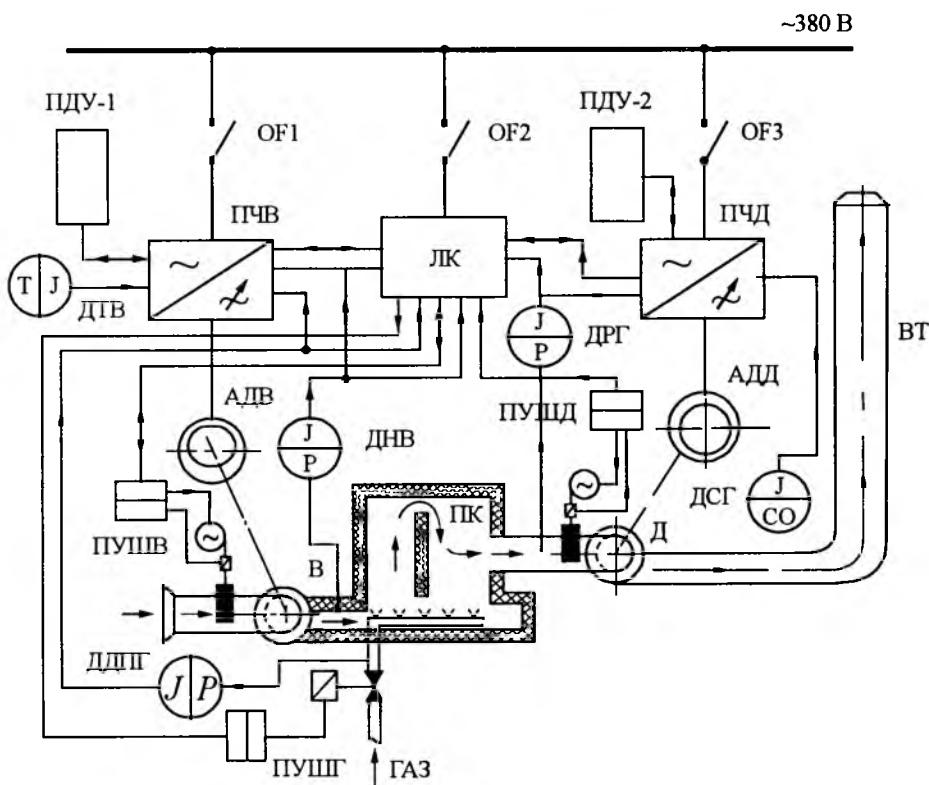
### Улучшение характеристик питающей сети

Во всем диапазоне рабочих скоростей и нагрузок коэффициент мощности электропривода близок к единице. Питающая сеть не нагружается реактивным током и, как следствие, не возникают дополнительные потери в подводящих проводах.

### Тягодутьевые механизмы котельной установки

Управление тягодутьевыми механизмами котельной осуществляют две независимые системы – система управления вентилятором и система управления дымососом. Каждая из этих систем автономна и может работать независимо от другой (рис.1).

Основным назначением системы управления тягодутьевыми механизмами является



**Рис.1. Структурно-технологическая схема водогрейного (парового) котла с частотным регулированием тягодутьевых механизмов с применением преобразователей частоты:**

OF1-OF3 – коммутационные аппараты; ПЧВ, ПЧД – преобразователи частоты; ПДУ – пульты дистанционного управления; АДВ, АДД – двигатели вентилятора и дымососа; В – вентилятор; Д – дымосос; ДДГ, ДНВ, ДРГ, ДСГ, ДТВ – датчики технологического процесса; ЛК – система управления котлом ("ламиконт"); ПУШ – приборы управления шиберами; ПК – котёл; ВТ – вытяжная труба

управление скоростью приводных электродвигателей так, чтобы в топке котла поддерживался оптимальный режим горения, т.е. были созданы благоприятные условия для полного сгорания топлива во всем диапазоне производительности котельной. Для этого необходимо в зависимости от количества поступающего топлива подать необходимое количество воздуха в топку, а также с заданной интенсивностью удалять из неё продукты сгорания.

Дополнительно эта система должна выполнять ряд вспомогательных функций. Требуется обеспечивать режим вентиляции котла, поддерживать заданный режим в момент розжига, иметь возможность управления дополнительными аппаратами, исключающими влияние дестабилизирующих факторов на режим горения и розжига.

Система управления тягодутьевыми механизмами не вмешивается в систему безопасности котла, но при желании может её информировать и выдавать упреждающие сигналы.

Задача поддержания оптимального режима горения в топке обеспечивается выбором необходимой частоты вращения электродвигателей тягодутьевых механизмов при **полностью открытых направляющих аппаратах** практически во всём диапазоне производительности котельной.

Однако иногда, при полностью открытых направляющих аппаратах, возможно возникновение неустойчивого режима горения при розжиге котла ("отрыв" пламени от запальника или от горелки). Неустойчивый режим определяется динамическими возмущениями давления / разрежения в топке котла, вызываемыми работой рядом расположенных котлов, связанных по газоходам с общей дымовой трубой. Причиной "отрыва" пламени может быть изменение естественной тяги дымовой трубы.

Влияние этих факторов может быть уменьшено или исключено, если при розжиге котла заправляющие аппараты прикрыть. Управление положением направляющих аппаратов введено в систему управления вентиляторами и дымососом.

Основным видом работы системы управления тягодутьевыми механизмами является автоматический и характеризуется переходами из одного режима работы котлоагрегата

в другой в зависимости от поступающих в систему управления сигналов. Так, поступающий из системы защиты разрешающий сигнал переводит тягодутьевые механизмы котельной из режима вентиляции топки в режим розжига, а затем, с увеличением количества поступающего топлива, система управления плавно переводит котёл в рабочий режим, где во всем диапазоне производительности котла поддерживается требуемое соотношение "топливо–воздух".

В случае возникновения аварийных ситуаций, при которых автоматика безопасности выдает команду на отсечку котла, система управления тягодутьевыми механизмами заставляет котёл перейти в режим вентиляции.

Для настройки систем управления котла предусмотрен ручной режим работы тягодутьевых механизмов с непосредственным управлением частотой вращения двигателей. Перевод системы управления из ручного режима в автоматический и обратно может быть произведён в любой момент независимо от режима работы другой системы. Предусмотрена возможность "безударного" переключения из одного режима в другой.

Управление тягодутьевыми механизмами, как указывалось выше, осуществляется двумя независимыми электроприводами, каждый со своей системой управления.

### Дымосос

Функцию поддержания неизменного во всем диапазоне производительности котла состояния в топке (разрежение, наддув) выполняет электропривод дымососа. Структурная схема системы управления электроприводом дымососа показана на рис.2. Цифро-



Рис.2. Структурная система управления электроприводом дымососа

вой пропорционально-интегральный регулятор управляет выходной частотой автономного инвертора и, следовательно, частотой вращения двигателя, поддерживая заданное значение давления в топке котла. Так как разжение в топке котла должно быть неизменно во всех режимах и во всем диапазоне производительности, удобней всего значение занести в поле программируемых параметров, хотя при желании допускается управление от встроенного потенциометра. Обязательным внешним сигналом для работы системы управления электропривода дымососа является аналоговый сигнал с первичного преобразователя (датчика) давления в топке котла. Если используется контур управления положением направляющего аппарата, то дополнительно необходимы ещё два аналоговых сигнала – производительности котельной установки (на рис.2  $P_{топл}$ ) и положения направ-

ляющего аппарата [выход дистанционного указателя положения (ДУП)], и один дискретный – переключатель вентиляция / работа. Этот дискретный сигнал, как правило, является выходным сигналом системы безопасности котла.

### Вентилятор

Система управления электроприводом вентилятора поддерживает заданное соотношение между количеством поступающего в топку котла топлива и оптимальным количеством воздуха во всём диапазоне производительности.

Структура системы управления электроприводом вентилятора выбирается при наладке тягодутьевых механизмов и определяется условиями эксплуатации котельной установки.

Эквивалентные структурные схемы возможных систем управления электроприводом вентилятора представлены на рис.3, 4. На рис.3

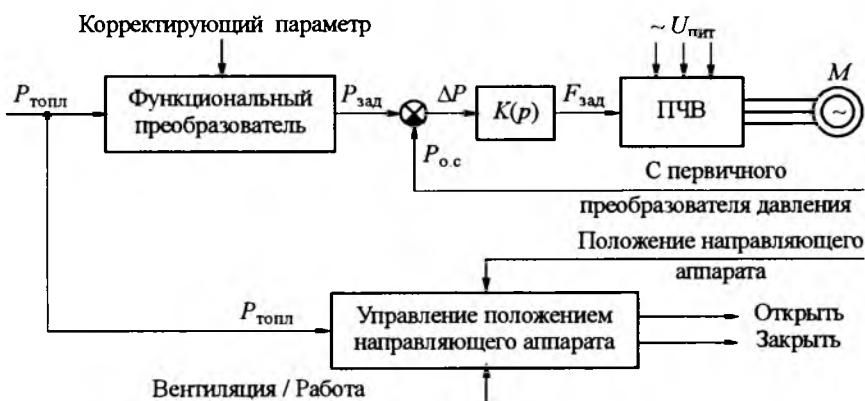


Рис.3. Структурная система управления электроприводом вентилятора при регулировании по соотношению "топливо–воздух"

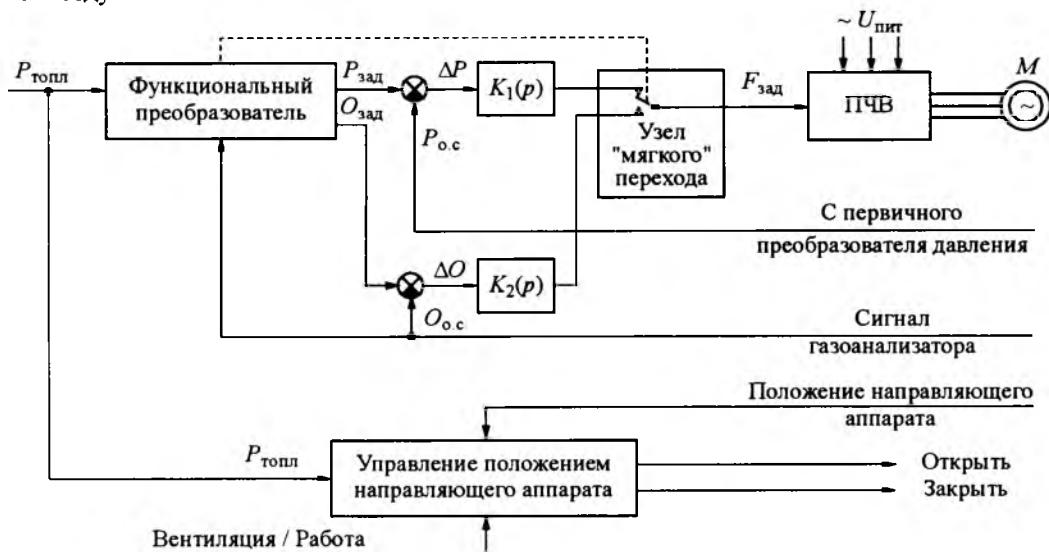


Рис.4. Структурная система управления электроприводом вентилятора при основном контуре регулирования по сигналу газоанализатора

показана система управления по заданному соотношению "топливо–воздух". Полученные при теплотехнической наладке котлоагрегата данные этого соотношения переводятся в линейное уравнение вида:

$$P_{\text{возд}} = k_1 P_{\text{газ}} - k_2.$$

Затем вычисляются коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  этого уравнения с учётом передаточных характеристик первичных преобразователей и их значения заносятся в программируемые параметры электропривода.

Один из возможных вариантов полученного уравнения показан на рис.5, откуда видно, что если вычислять необходимое количество воздуха строго по этому уравнению, то при розжиге и для малой производительности котельной системы управления должна прекратить подачу воздуха. Для устранения этого эффекта на начальном участке характеристики соотношения "топливо–воздух" производится её излом так, чтобы в любом случае (в том числе при отсутствии топлива) поступало минимально необходимое количество воздуха.

Все эти вычисления производятся в функциональном преобразователе, выход которого является сигналом для системы регулирования.

Дополнительно в функциональном преобразователе производится обработка заведённого в него аналогового сигнала корректирующего параметра. Действие этого сигнала заключается в изменении наклона вычисляемого уравнения,

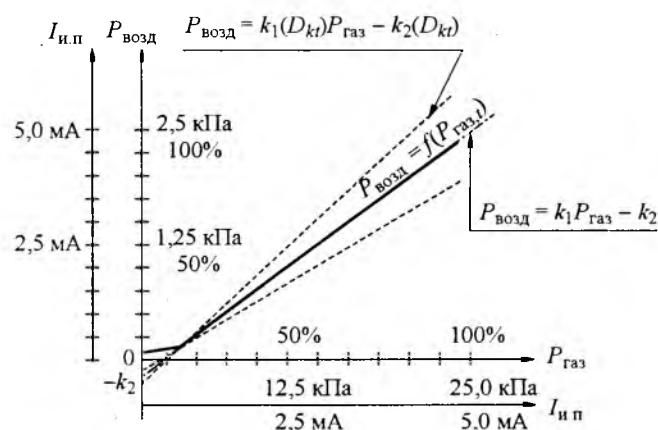


Рис.5. Вид характеристики при регулировании соотношения "топливо–воздух":

$P_{\text{газ}}$  – давление газа перед горелкой;  $P_{\text{возд}}$  – давление воздуха в воздуховоде перед горелкой;  $I_{\text{изл.п.}}$  – ток измерительного преобразователя;  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты линейного уравнения;  $D_{kt}$  – коэффициент, учитывающий температуру поступающего в топку воздуха

заставляя зависимость соотношения "топливо–воздух" двигаться по скорректированной характеристике. На рис.5, для примера, штриховой линией показаны две характеристики соотношения для различных температур направляемого в топку котла воздуха.

Реакция системы управления на действие корректирующего параметра происходит с достаточно малым коэффициентом передачи, т.е. переход с одной характеристики на другую происходит достаточно медленно, чтобы все переходные процессы в системе регулирования заканчивались до следующего перехода.

Значения всех поступающих на функциональный преобразователь параметров и его выходного сигнала могут быть выведены на цифровое табло электропривода для визуального контроля.

Более прогрессивным способом поддержания оптимального соотношения "топливо–воздух" котельной установки является управление подачей воздуха на основе анализа состава дымовых газов. Регулирование подачей воздуха учитывает все флюктуации качества топлива, температуры подаваемого в топку воздуха, а также погрешности преобразователей.

На рис.5 показана система управления электроприводом вентилятора, где основным контуром регулирования подачей воздуха в топку котла является контур на основе анализа состава дымовых газов. На рис.5 изображена структура регулирования подачей воздуха по количеству остаточного кислорода в дымовых газах. При управлении по какому-либо другому газу алгоритм работы системы управления и эквивалентная структурная схема не изменяются.

Если основным контуром регулирования подачей воздуха является контур с анализом состава отходящих дымовых газов по процентному содержанию какой-либо составляющей, то возникает необходимость в дополнительном контуре. Это связано с тем, что при розжиге котла и на начальном участке его производительности состав отходящих газов мало отличается от состава поступающего в топку воздуха, и система управления, замкнутая по сигналу газоанализатора, будет неэффективна. Таким образом, на начальном участке производительности котла необходим дополнительный контур. Таким дополнительным контуром является контур поддержания расхода (давления) поступающего в топку воздуха. Затем, при до-

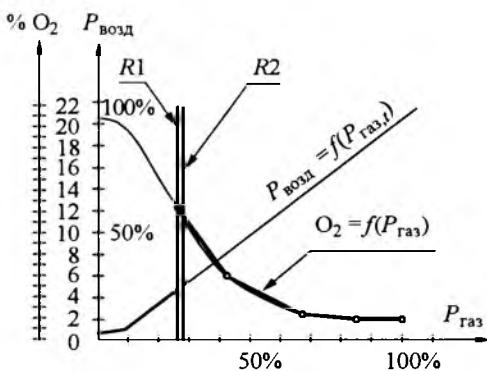


Рис.6. Вид характеристики при регулировании соотношения "топливо–воздух" при основном контуре управления по сигналу газоанализатора:

$P_{\text{газ}}$  – давление газа перед горелкой;  $P_{\text{возд}}$  – давление воздуха в воздуховоде перед горелкой;  $O_2$  – процентное содержание кислорода в отходящих дымовых газах;  $R1, R2$  – зоны коррекции при переходе с основной системы управления на дополнительную и наоборот

стижении определенной (программно заданной) производительности, система управления переходит с дополнительного контура регулирования на основной. Это переключение должно быть "мягким", без скачков скорости вентилятора. Для достижения этого перед переключением контуров включается режим регулирования с пошаговой коррекцией. Как было подчеркнуто, быстродействие системы управления по корректирующему параметру достаточно мало, чтобы прекращались переходные процессы всех систем регулирования и в топке котла устанавливался стационарный режим перед очередным шагом. Данный режим коррекции продолжается до тех пор, пока не сравниваются значения сигналов задания и обратной связи. При увеличении производительности – это требуемое процентное содержание какой-либо составляющей отходящих дымовых газов с действительным его значением, а при снижении производительности условием перехода на дополнительный контур является равенство действительного давления воздуха перед горелкой заданному. Для исключения неопределенного состояния системы зоны переходов  $R1$  и  $R2$ , как показано на рис.6, разнесены. В зоне  $R2$  производится переход с дополнительной системы регулирования на основную, а в  $R1$  – из основной на дополнительную.

## Узел управления положением направляющего аппарата

Для исключения нежелательного влияния destabilizирующих факторов на режим розжига и работу котельной в начальном диапазоне её производительности каждый электропривод тягодутьевых механизмов (вентилятора, дымососа) в своём составе имеет узел управления положением направляющего аппарата.

При параллельной работе нескольких электроприводов с одинаковым назначением и наличием в воздуховоде (газоходе) каждого двигателя направляющего аппарата управление отдельными направляющими аппаратами производится индивидуально каждым электроприводом.

Эквивалентная структурная схема, поясняющая принцип работы этого узла, приведена на рис.7, где указаны все необходимые сигналы и связи для её функционирования.

Настройка этого узла заключается в том, что весь рабочий диапазон производительности котельной установки разбивается на несколько поддиапазонов (до семи) с заданием положения направляющего аппарата в каждом из них. Для исключения режима автоколебаний на границе поддиапазонов вводится зона нечувствительности. В специально выделенном поле программируется положение направляющего аппарата при вентиляции топки котла. Все эти данные хранятся в специальной таблице программируемых параметров.

Сигналом обратной связи узла управления положением направляющего аппарата является сигнал, снимаемый с чувствительного элемента дистанционного указателя положения.

Выходными сигналами узла являются два релейных (сухие контакты) сигнала, которые включают двигатель изменения положения направляющего аппарата.

Управление положением направляющего аппарата производится по циклограмме, показанной на рис.8. Такое циклическое включение двигателя, управляемого положением направляющего аппарата, связано с тем, что при резком изменении его положения во все системы управления и регулирования котлоагрегата вводятся такие динамические возмущения, которые приводят его на грань аварийного состояния. Времена  $T_{\text{ц}}$  и  $t_{\text{в}}$  – период между очередными включениями двигателя и время его ра-

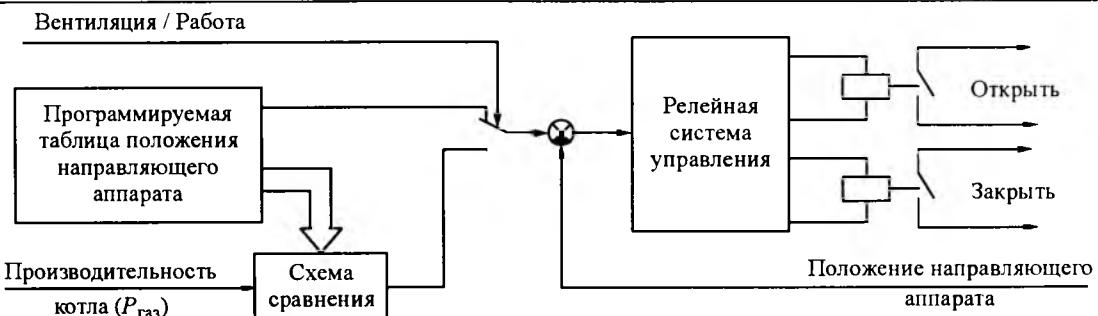


Рис.7. Эквивалентная структурная система узла управления положением направляющего аппарата

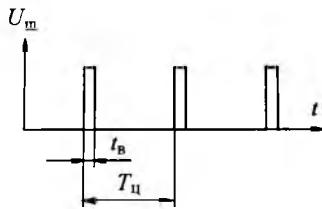


Рис.8. Циклограмма управления положением направляющего аппарата

боты соответственно. Эти времена программируются при наладке системы управления тягодутьевыми механизмами.

### Насосы

Управление производительностью большого количества насосов (сетевых, подпиточных, рециркуляционных мазутных и др.) в технологическом цикле котельной до сих пор производится вводом в сеть трубопроводов машин дополнительного гидравлического сопротивления. Данный метод приводит к неоправданным потерям энергии и преждевременному износу оборудования.

Большая часть электроэнергии, потребляемой котельной, расходуется насосным оборудованием. Основной экономический эффект от установки управляемых электроприводов на насосной определяется именно экономией электроэнергии.

Эффективность замены существующего способа управления производительностью дросселированием на частотно-управляемый электропривод в достаточном объеме освещена в специальной технической литературе.

Широко развитое программное обеспечение электроприводов позволяет управлять практически любым специализированным насосным механизмом. Целый ряд программных возможностей позволяет адаптировать конкретный насосный механизм к выполняемой им функции.

Необходимое количество программируемых дискретных входов и многофункциональных релейных выходов позволяет без дополнительных материальных затрат встраивать электроприводы в существующие релейно-контактные схемы. Аналоговые входы с обработкой сигнала любого унифицированного уровня легко согласуются с сигналами первичных преобразователей контролируемых параметров. Наличие узла контроля исправности первичного преобразователя и программируемой реакции электропривода при обнаружении неисправности существенно повышает эксплуатационную надежность различных систем с встроенным частотно-управляемым электроприводом.

### Другое технологическое оборудование и вспомогательные механизмы

Функциональное назначение разнообразных дополнительных механизмов котельной мало отличается от механизмов различных горно-обогатительных, металлургических и других предприятий. Технологическое оборудование, обеспечивающее работу котельной установки с твердым топливом (различные дробилки, мельницы, сепараторы, питатели и т.д.), а также механизмы вспомогательного оборудования котельной занимают небольшой объем в общем балансе потребляемой энергии, поэтому говорить о существенной ее экономии здесь не приходится.

Однако эти сравнительно маломощные приводные механизмы достаточно дороги и имеют ресурс работы, зависящий от их скорости. Для некоторых механизмов эта зависимость нелинейная и износ оборудования резко увеличивается на повышенных оборотах. Как уже подчеркивалось, изначально частота вращения выбирается из условий пиковой производительности и на этой завышенной частоте вращения

всё технологическое оборудование вынуждено работать всё время. Необходимое снижение производительности этого оборудования чаще всего достигается или недогрузкой механизма, или введением цикличности его работы с частыми динамическими ударами пусковых режимов, или применением различных малонадёжных механических вариаторов. Всё это является полумерами, и только установка частотно-управляемого электропривода легко позволяет эффективно разрешить целый ряд проблем.

### Промышленные испытания систем

На Михайловском ГОК в 1999 г. были проведены промышленные испытания системы управления и регулирования тягодутьевыми механизмами и подпиточными насосами котла ДКВР 20/13 с применением преобразователей частоты АТ-02, в ходе которых получены следующие результаты:

- системы управления и регулирования работоспособны и выполняют заданные функции;
- отказов в работе систем управления и регулирования, а также преобразователя частоты не было;
- мощности, потребляемые двигателями дымососа и вентилятора с установленной мощностью 37 кВт, снизились и составили в среднем у дымососа 9 кВт, у вентилятора 7 кВт;
- суточный расход электроэнергии двигателями на действующей системе регулирования в среднем – у вентилятора 570 кВт·ч, у дымососа 570 кВт·ч, на установленной системе частотного регулирования в среднем – у вентилятора 168 кВт·ч, у дымососа 216 кВт·ч.

Испытания системы управления и регулирования подпиточных насосов с применением преобразователя АТ-02-37 показали следующие результаты:

- система управления и регулирования работоспособна и выполняет заданные функции регулирования подпиточных насосов без включения действующих регуляторов Р25.1 подпитки магистрали обратной воды;
- отказов в работе системы управления и регулирования и преобразователей частоты АТ-02 не было;
- мощность, потребляемая двигателем насоса, за счёт исключения работы регуляторов Р25.1, вносящих дополнительные сопротивления в сеть, снизилась в несколько раз и составила в среднем 1,5 кВт в режиме подпитки,

действующем в течении периода испытаний, при установленной мощности двигателя 30 кВт и среднем расходе до 15–20 м<sup>3</sup>/ч.

Суточный расход электроэнергии двигателем подпиточного насоса составил:

- на действующей системе регулирования производительности в среднем 500 кВт·ч;
- на установленной системе частотного регулирования производительность в среднем 50 кВт·ч.

### Выводы

1. Система управления тягодутьевыми машинами котла ДКВР 20/13 № 3 с частотным регулированием режимов выполняет заданные функции, соответствуют ПУЭ, ПТЭ и ПТБ электроустановок и может быть принята в опытно-промышленную эксплуатацию.

2. Система управления и регулирования производительности двух подпиточных насосов Д 200/36 выполняет заданные функции, соответствуют ПУЭ, ПТЭ и ПТБ электроустановок, обеспечивая безопасную эксплуатацию насосов и может быть принята в постоянную эксплуатацию.

3. Сроки окупаемости систем регулирования тягодутьевыми механизмами и подпиточными насосами с применением преобразователей частоты паровых котлов ДКВР и водогрейных котлов КГВМ, ПГВМ на действующих котельных составляют 6–12 мес.

4. Уменьшается расход газа – до 4–5% за счёт более оптимального соотношения "газ–воздух" при горении газа.

5. Существенно уменьшаются – до 20–40% износ и аварийность механизмов и электроаппаратуры.

6. Результаты испытаний подтверждены длительной эксплуатацией систем на ряде промышленных предприятий и объектах коммунального хозяйства.

7. Разработанные корпорацией "ТРИОЛ" системы рекомендуются для широкого применения в котельных промышленных объектов и коммунального хозяйства.

**Хечуев Юрий Дмитриевич** – директор отделения "Гортехтранс" ОАО НИИ КМА, канд. техн. наук.

**Калашников Борис Евгеньевич** – главный инженер корпорации "Триол", канд. техн. наук.

**Ольшевский Виктор Иосифович** – руководитель группы разработки.

# Анализ и моделирование симплексных алгоритмов управления трёхфазными автономными инверторами напряжения для частотного асинхронного электропривода

КРУТИКОВ К.К., РОЖКОВ В.В., ПЕТРУХИН Ю.В.

Рассмотрены подробности реализации принципиальных положений одного из эффективных симплексных алгоритмов ШИМ. Разработанная компьютерная модель в MATLAB позволяет упростить все этапы построения микропроцессорной системы управления АИН.

В [1] рассмотрены принципиальные вопросы формирования импульсов управления автономным трёхфазным АИН с применением различных симплексных алгоритмов. В частности, предлагается в качестве одного из эффективных разбиений области реализуемых шести ненулевых векторов напряжений разбиение на шесть симплексов четырёх различных типов (рис. 1), названное авторами как разбиение Р<sub>4-6</sub>. На наш взгляд, стратегические соображения, выдвинутые в [1], нуждаются в подробных разъяснениях. Без них материалы [1] и им подобные (тех же авторов) лишь показывают принципиальное значение новых оригинальных симплексных алгоритмов, но едва ли найдут последователей, способных самостоятельно осуществить их на практике.

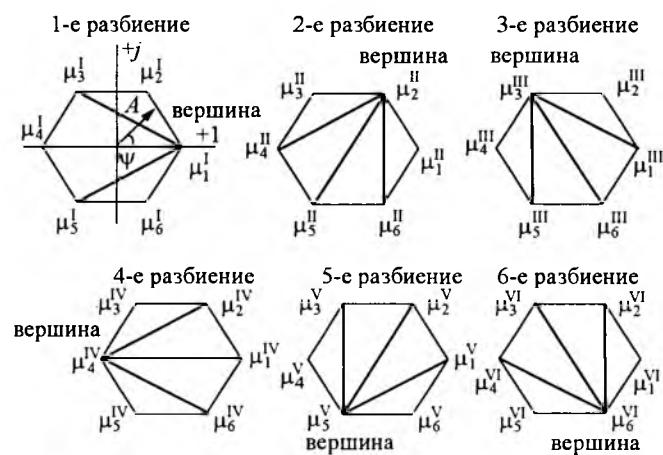


Рис.1

Basic positions of effective simplex PWM-method are considered. The developed computer model in MATLAB allows to simplify all stages of construction of microprocessor control system for inverter.

Рассмотрим подробнее детали реализации симплексных методов на примере указанного в [1] разбиения Р<sub>4-6</sub>, начиная от формирования уравнений для расчёта относительных длительностей каждого из шести разбиений, на которые разбит период несущей, решения этих уравнений, и кончая применением полученных решений для построения системы управления ключами АИН.

Согласно [1] вся комплексная плоскость действия шести векторов напряжения  $\bar{U}_1 - \bar{U}_6$  покрывается непересекающимися треугольниками (симплексами) четырёх различных типов с общей вершиной, которая может перемещаться, образуя шесть типов разбиений. Каждому из разбиений отводится 1/6 части периода несущей частоты ШИМ. Если вектор управления  $\bar{A}$  известен по амплитуде  $A$  и имеет известный угол поворота  $\Psi$  относительно горизонтальной вещественной оси, то для каждого из шести разбиений он будет расположен в поле только одного из четырёх возможных симплексов. Поскольку симплексы в разных разбиениях подобны, можно использовать это подобие для упрощения необходимых математических действий по определению относительных длительностей частичных интервалов в каждом из разбиений. Результирующие длительности, которые и будут в дальнейшем определять разбиение периода несущей на шесть интервалов  $\mu_1 - \mu_6$ , могут быть получены как сумма частичных однотипных составляющих, рассчитанных для

каждого из шести разбиений. Удобно за основу взять первое разбиение с вершиной  $\mu_1^I$ . Вектор управления  $\bar{A} = A \angle \Psi$  в первом разбиении может быть расположен в поле одного из четырёх симплексов: 1)  $\mu_1^I, \mu_3^I, \mu_4^I$ , 2)  $\mu_1^I, \mu_2^I, \mu_3^I$ , 3)  $\mu_1^I, \mu_4^I, \mu_5^I$ , 4)  $\mu_1^I, \mu_5^I, \mu_6^I$ . Условия принадлежности вектора  $\bar{A}$  одному из них определяются в функции амплитуды и угла в виде соответствующих неравенств, которые будут определены далее. Тогда можно решить три уравнения: первые два – по проекциям вектора на вещественную и мнимую оси, а третью – из условия, что сумма относительных длительностей, образующих данный симплекс, равна единице (100% отведённого времени на данное разбиение, составляющее 1/6 часть периода несущей). Итого на первом разбиении можно составить четыре системы по три уравнения в каждой, охватывающие все возможные случаи расположения вектора управления, и решить одну из этих систем.

На втором разбиении можно полагать, что оси комплексной плоскости повернулись относительно первоначального расположения для первого разбиения на угол  $\pi/3$  против часовой стрелки. Тогда тот же вектор управления в новой системе координат второго разбиения будет определяться прежней амплитудой, а его угол поворота относительно новой вещественной оси, совпадающей с направлением вершины второго разбиения, будет определяться как  $\psi^{II} = 2\pi - \frac{\pi}{3} + \psi$ . При этом рассматриваемый вектор может попасть в поле другого симплекса по сравнению с первоначальным. Уравнения, определяющие три относительные частичные длительности, образующие этот симплекс, можно не составлять, а использовать нужную систему уравнений из четырёх для первого разбиения с соответствующими переименованиями решений этих уравнений.

Для третьего–шестого разбиений углы поворота относительно новой системы координат будут определяться как:

$$\psi^{III} = 2\pi - \frac{2\pi}{3} + \psi; \quad \psi^{IV} = 2\pi - \pi + \psi;$$

$$\psi^V = 2\pi - \frac{4\pi}{3} + \psi; \quad \psi^{VI} = 2\pi - \frac{5\pi}{3} + \psi.$$

Таким образом, можно обойтись 12 уравнениями для получения шести из возможных 72 решений.

### Системы уравнений в базовых координатах

1. Симплекс  $\mu_1^I, \mu_3^I, \mu_4^I$ . Условия принадлежности вектора  $\bar{A} = A \angle \Psi$  данному симплексу:

$$\begin{cases} \text{при } 0 \leq \psi \leq 2\pi/3 \text{ и } A \cos(\pi/3 - \psi) < 0,5; \\ \text{при } 2\pi/3 \leq \psi \leq \pi \text{ и любом } A < 1. \end{cases}$$

Уравнения:

$$A \cos \psi = \mu_1^I - \mu_4^I - \mu_3^I \frac{1}{2}; \quad A \sin \psi = \mu_3^I \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$\mu_1^I + \mu_4^I + \mu_3^I = 1.$$

Решения уравнений:

$$\mu_1^I = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2A}{\sqrt{3}} \cos \left( \psi + \frac{\pi}{6} \right) \right]; \quad (1)$$

$$\mu_3^I = \frac{2A}{\sqrt{3}} \sin \psi; \quad (2)$$

$$\mu_4^I = \frac{1}{2} \left[ 1 - 2A \cos \left( \psi - \frac{\pi}{3} \right) \right]. \quad (3)$$

2. Симплекс  $\mu_1^I, \mu_2^I, \mu_3^I$ . Условия принадлежности вектора  $\bar{A} = A \angle \Psi$  данному симплексу:

при  $0 \leq \psi \leq 2\pi/3$  и  $A \cos(\pi/3 - \psi) > 0,5$ .

Уравнения:

$$A \cos \psi = \mu_1^I - \mu_3^I \frac{1}{2} + \mu_2^I \frac{1}{2}; \quad A \sin \psi = \mu_2^I \frac{\sqrt{3}}{2} + \mu_3^I \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$\mu_1^I + \mu_2^I + \mu_3^I = 1.$$

Решения уравнений:

$$\mu_1^I = 1 - \frac{2A}{\sqrt{3}} \sin \psi; \quad (4)$$

$$\mu_2^I = -1 + 2A \cos \left( \psi - \frac{\pi}{3} \right); \quad (5)$$

$$\mu_3^I = 1 - \frac{2A}{\sqrt{3}} \cos \left( \psi - \frac{\pi}{6} \right). \quad (6)$$

3. Симплекс  $\mu_1^I, \mu_4^I, \mu_5^I$ . Условия принадлежности вектора  $\bar{A} = A \angle \Psi$  данному симплексу:

$$\begin{cases} \text{при } 4\pi/3 \leq \psi \leq 2\pi \text{ и } A \cos(5\pi/3 - \psi) < 0,5; \\ \text{при } \pi \leq \psi \leq 4\pi/3 \text{ и любом } A < 1. \end{cases}$$

Уравнения:

$$A \cos \psi = \mu_1^I - \mu_4^I - \mu_5^I \frac{1}{2}; \quad A \sin \psi = -\mu_5^I \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$\mu_1^I + \mu_4^I + \mu_5^I = 1.$$

Решения уравнений:

$$\mu_1^I = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2A}{\sqrt{3}} \cos \left( \psi - \frac{\pi}{6} \right) \right]; \quad (7)$$

$$\mu_4^I = \frac{1}{2} \left[ 1 - 2A \cos \left( \psi + \frac{\pi}{3} \right) \right]; \quad (8)$$

$$\mu_5^I = -\frac{2A}{\sqrt{3}} \sin \psi. \quad (9)$$

4. Симплекс  $\mu_1^I, \mu_5^I, \mu_6^I$ . Условия принадлежности вектора  $\bar{A} = A \angle \Psi$  данному симплексу: при  $4\pi/3 \leq \psi \leq 2\pi$  и  $A \cos(5\pi/3 - \psi) > 0,5$ .

Уравнения:

$$A \cos \psi = \mu_1^I - \mu_5^I \frac{1}{2} + \mu_6^I \frac{1}{2}; \quad A \sin \psi = -\mu_6^I \frac{\sqrt{3}}{2} - \mu_5^I \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$\mu_1^I + \mu_5^I + \mu_6^I = 1.$$

Решения уравнений:

$$\mu_1^I = 1 + \frac{2A}{\sqrt{3}} \sin \psi; \quad (10)$$

$$\mu_5^I = 1 - \frac{2A}{\sqrt{3}} \cos \left( \psi + \frac{\pi}{6} \right); \quad (11)$$

$$\mu_6^I = -1 + 2A \cos \left( \psi + \frac{\pi}{3} \right). \quad (12)$$

### Пример расчёта

Пусть  $A = 1/3$ ,  $\psi = \pi/6$ . Для первого разбиения вектор принадлежит симплексу  $\mu_1^I, \mu_3^I, \mu_4^I$ . Решение уравнений (1)–(3) даёт

$$\mu_1^I = 0,596; \quad \mu_3^I = 0,192; \quad \mu_4^I = 0,211.$$

$$\mu_1^I + \mu_3^I + \mu_4^I = 0,596 + 0,192 + 0,211 = 1.$$

На втором разбиении  $\psi^II = \frac{11\pi}{6}$ . При  $A = 1/3$

вектор принадлежит симплексу  $\mu_2^II, \mu_5^II, \mu_6^II$ . В этом случае для расчёта пользуемся системой уравнений (7)–(9), принимая соответствие между решениями в базовой системе координат (старой) и во втором разбиении

(новой) как  $\mu_1^I \rightarrow \mu_2^II, \mu_4^I \rightarrow \mu_5^II, \mu_5^I \rightarrow \mu_6^II$ . Решение имеет вид:  $\mu_2^II = 0,596; \mu_5^II = 0,211; \mu_6^II = 0,192$ .

На третьем разбиении  $\psi^III = \frac{4\pi}{3} + \psi = \frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{6}$ .

Тогда вектор заданной длины принадлежит симплексу  $\mu_3^III, \mu_6^III, \mu_1^III$ . На четвёртом разбиении

$\psi^IV = \pi + \psi = \pi + \frac{\pi}{6}$  (симплекс  $\mu_4^IV, \mu_1^IV, \mu_2^IV$ ). На

пятом разбиении  $\psi^V = \frac{2\pi}{3} + \psi = \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}$  (симплекс  $\mu_5^V, \mu_1^V, \mu_2^V$ ). На шестом разбиении

$\psi^VI = \frac{\pi}{3} + \psi = \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6}$  (симплекс  $\mu_6^VI, \mu_2^VI, \mu_3^VI$ ).

Суммирование рассчитанных частичных длительностей по всем разбиениям даёт:

$$\mu_1 = \frac{1}{6} (\mu_1^I + \mu_1^{III} + \mu_1^{IV} + \mu_1^V) = \frac{1}{6} (0,596 + 0,385 + 0,5 + 0,192) = 0,279;$$

$$\mu_2 = \frac{1}{6} (\mu_2^I + \mu_2^{IV} + \mu_2^V + \mu_2^{VI}) = \frac{1}{6} (0,596 + 0,192 + 0,5 + 0,385) = 0,279;$$

$$\mu_3 = \frac{1}{6} (\mu_3^I + \mu_3^{III} + \mu_3^{VI}) = \frac{1}{6} (0,192 + 0,404 + 0,211) = 0,135;$$

$$\mu_4 = \frac{1}{6} (\mu_4^I + \mu_4^{IV}) = \frac{1}{6} (0,211 + 0,308) = 0,0865;$$

$$\mu_5 = \frac{1}{6} (\mu_5^I + \mu_5^{V}) = \frac{1}{6} (0,211 + 0,308) = 0,0865;$$

$$\mu_6 = \frac{1}{6} (\mu_6^I + \mu_6^{III} + \mu_6^{VI}) = \frac{1}{6} (0,192 + 0,211 + 0,404) = 0,135.$$

Проверка по всем разбиениям даёт:  $\sum \mu_i = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 + \mu_5 + \mu_6 = 1$ . Симметрия в решении ( $\mu_1 = \mu_2, \mu_4 = \mu_5, \mu_3 = \mu_6$ ) обусловлена тем, что в данном примере вектор управления лежит на биссектрисе угла  $60^\circ$ .

### Построение системы управления АИН с симплексными алгоритмами управления

Цикл управления на периоде несущей (с переходами от одного состояния к другому только одним переключением) состоит из шести

последовательных интервалов времени, действующих друг за другом:  $\mu_1 \rightarrow \mu_2 \rightarrow \mu_3 \rightarrow \mu_4 \rightarrow \mu_5 \rightarrow \mu_6 \rightarrow \rightarrow \mu_1$ . Вектор управления на каждом из периодов несущей последовательно проходит все шесть состояний и действует в одноименных отрезках времени:  $\bar{U}_1 \rightarrow \bar{U}_2 \rightarrow \bar{U}_3 \rightarrow \bar{U}_4 \rightarrow \bar{U}_5 \rightarrow \bar{U}_6 \rightarrow \bar{U}_1$ .

Началом цикла будет интервал  $\mu_1$ , и вектор управления будет расположен горизонтально. Затем начнется его скачкообразное вращение в положительном направлении с теми длительностями, которые соответствуют найденным значениям. Суммарное время цикла составит период несущей.

При любых средствах реализации рассмотренных алгоритмов можно выделить общие задачи, подлежащие решению в реальном масштабе времени. Они состоят в вычислении относительных длительностей разбиения периода несущей на шесть интервалов времени, реализации вычисленных временных интервалов и превращения их в реальные импульсы управления ключами АИН. Наибольшие сложности, как следует из всего сказанного, представляет первая задача, вторая является стандартной, и методы её решения достаточно хорошо освоены.

Рассмотрим различные подходы к расчёту относительных длительностей. В вычислительном цикле предстоит для первого разбиения и всех последующих пяти определить по условиям, рассмотренным выше, принадлежность к соответствующему симплексу. Всего в шести разбиениях при количестве вариантов для каждого из них по четыре существует 24 варианта симплексов с тремя вершинами, где может потребоваться решение трёх уравнений. Итого, для принятия окончательного разбиения периода несущей на интервалы нужно опираться на решение  $24 \times 3 = 72$  уравнений.

Рассмотрим требуемую точность расчёта относительных длительностей, достаточную для слежения за вектором управления с заданными амплитудной и фазовой погрешностями.

Пусть,  $\bar{A} = (A + \Delta A) \angle (\Psi + \Delta \Psi)$ , где  $\Delta A$  и  $\Delta \Psi$  – допустимые погрешности. Например, для системы (1)–(3) формула расчёта  $\mu_1^I$  с учётом погрешности имеет вид:

$$\bar{\mu}_1^I = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2(A + \Delta A)}{\sqrt{3}} \cos\left(\Psi + \Delta \Psi + \frac{\pi}{6}\right) \right].$$

Разность между точным и оцененным с погрешностью значением  $\mu_1^I$

$$\Delta \mu_1^I = -\frac{\Delta A \Delta \Psi}{\sqrt{3}} \sin\left(\Psi + \frac{\pi}{6}\right).$$

Здесь принято, что  $\sin \Delta \Psi \approx \Delta \Psi$ , а  $\cos \Delta \Psi \approx 1$ . Наибольшее значение данной погрешности

$$|\Delta \mu_{1\max}^I| = \frac{\Delta A \Delta \Psi}{\sqrt{3}}.$$

Если допустить наибольшую амплитудную погрешность  $\Delta A_{\max} = 0,01$  (т.е. 1% амплитуды  $A$ ) и угловую погрешность  $\Delta \Psi_{\max} = 1^\circ = 1/57,3$  рад, то максимальная погрешность составит  $|\Delta \mu_{1\max}^I| \approx 1 \cdot 10^{-4}$ . Это означает, что значение этой длительности должно быть рассчитано с точностью до 4-го знака.

Пусть частота несущей составляет 10 кГц, т.е. период несущей равен 100 мкс. Одна десятическая этого периода будет составлять 0,01 мкс = 10 нс. Отсюда следует, что тактовая частота таймера для расчета  $\mu_1^I$  с указанной погрешностью при частоте несущей 10 кГц должна составлять 100 МГц, что трудно реализовать.

Если частоту несущей снизить в 5 раз до 2 кГц, то требуемая тактовая частота таймера может составить 20 МГц. Если при этом уменьшить точность расчёта до  $|\Delta \mu_{1\max}^I| \approx 1 \cdot 10^{-3}$  (что приведет к угловой и амплитудной погрешности свыше 4%), то тактовая частота ограничится 2 МГц, что уже приемлемо в смысле частоты таймера. На практике на разных разбиениях вычислительные погрешности могут иметь разные знаки (суммарная погрешность усредняется), и рассмотренные требования к тактовой частоте таймера относятся к наихудшему случаю.

Оценим длительность вычислительного цикла по описанной методике. Анализ формул (1)–(12) показывает, что даже вычисление по этим формулам требует операций умножения, сложения, извлечения тригонометрических функций, а также сохранения промежуточных результатов и их последующего сложения по всем разбиениям. Все эти действия в сумме не должны превышать длительность периода несущей частоты ШИМ (расчёт длительностей в процессорной части контроллера осуществляется на последу-

ющий период ШИМ). Альтернативным вариантом решения является использование программируемой логической матрицы, в которую занесены с допустимой точностью ( $\Delta A_{\max} = 0,01$  и  $\Delta \Psi_{\max} = 1^\circ = 1/57,3$  рад) решения уравнений для каждой суммарной относительной длительности в виде массива размерностью  $100 \times 100$ . Тогда задача расчёта интервалов разбиений отпадает, и такой вариант становится вполне реализуем. Для получения массива данных  $\mu_i$  (где  $i = 1 \dots 6$ ) в функции двух переменных  $A$  и  $\psi$  с заданным шагом приращения этих величин удобно использовать модель в среде MATLAB.

### Моделирование системы управления АИН с симплексными алгоритмами управления

Модель (рис.2) включает в себя блоки:

1. Блок формирования задания  $A$  и  $\psi$  в функции времени.
2. Блок формирования длительностей  $\mu_i$ , построенный по принципу разбиения  $P_{4-6}$  – Form\_m\*.
3. Блок, определяющий алгоритм последовательностей интервалов, ALGORITHM SERIAL INTERVAL.

4. Блок выдержки длительностей  $\mu_i$  на периоде несущей с хранением последней команды  $\mu_6$  – TIMER m\*.

5. Блок ПЗУ – PZU.

6. Силовая часть инвертора.

7. Служебные блоки.

Опишем кратко каждый блок.

1. Блок задания формирует сигналы  $A$  и  $\psi$  с желаемым темпом нарастания.

2. Блок формирования длительностей составляет основную часть модели. По заданным входным сигналам ( $A$  и  $\psi$ ) сначала определяются условия, в каком симплексе находится вектор  $\bar{A} = A \angle \Psi$  в базовой системе координат на первом разбиении. Причём, если  $\Psi > 2\pi$ , внешняя система нормирует его, вычитая  $n2\pi$ , чтобы этот угол оставался в диапазоне  $0 \leq \Psi \leq 2\pi$ .

Вычислительная часть модели содержит 4 блока с решениями систем уравнений (1)–(3), (4)–(6), (7)–(9), (10)–(12). Эти блоки постоянно готовы к принятию входной информации об амплитуде и угле. Автоматически входная информация поступает только на тот блок, который требуется для считывания выходных значений частичных интервалов на

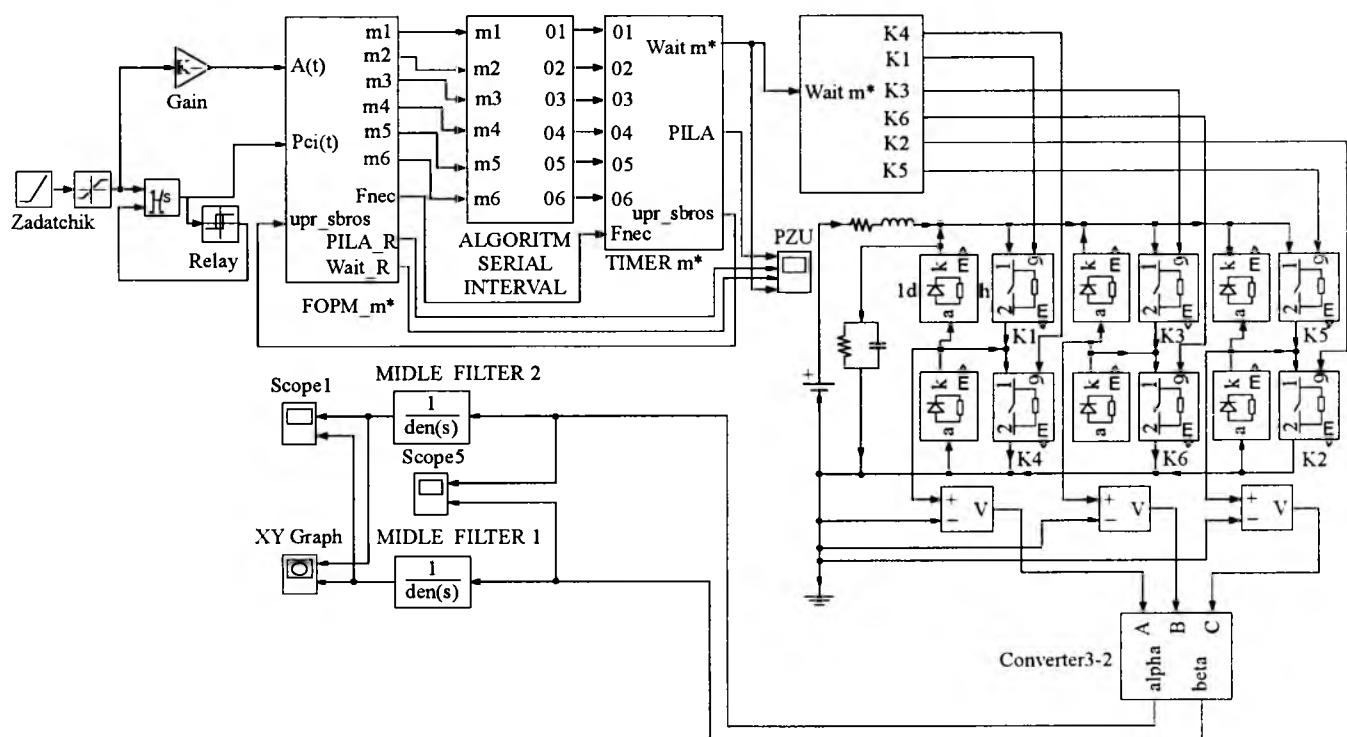


Рис.2  
Вологодская областная универсальная научная библиотека  
www.booksite.ru

первом разбиении. Остальные блоки "заморожены", и на их выходах устанавливаются нулевые выходные значения. После вычисления всех частичных интервалов первого разбиения результаты расчёта передаются в блок хранения, где они остаются до тех пор, пока не выполняются расчёты во всех шести разбиениях.

После первого разбиения система автоматически приступает к подготовке и проведению расчётов во втором разбиении: вводятся по-

правки на угол  $\psi^{\text{II}} = 2\pi - \frac{\pi}{3} + \psi$ . Производится

аналогичный цикл расчётов с отправлением результатов также в блок хранения. Далее вводит-

ся поправка на угол  $\psi^{\text{III}} = \frac{4\pi}{3} + \psi$  и повторяют-  
ся все расчёты на последующих разбиениях.

По сигналу окончания расчётов всех шести разбиений частичные длительности поступают на блок суммирования. При этом правильность рассчитанных результатов в блоке суммирования контролируется – сумма длительностей должна быть равна единице ( $\sum \mu_i = 1$ ). Кроме того, в этом блоке организуется выдержка времени для хранения суммарной длительности последнего (шестого) разбиения. Это делается для того, чтобы до начала следующего цикла расчётов команда управления соответствовала  $\mu_6$  и состояние ключей инвертора определялось бы ею.

3. В этом блоке содержатся сумматоры, на входы которых подаются рассчитанные длительности. На шести выходах сформированы цифровые команды, соответствующие последовательно нарастающим суммам  $\mu_1, \mu_1 + \mu_2, \mu_1 + \mu_2 + \mu_3$  и т.д.

4. Блок выдержки длительностей имеет генератор несущей пилы, сигнал которого подаётся на релейные элементы, где происходит сравнение каждой из шести нарастающих сумм с пилой, имеющей высоту, равную единице. Запуск этой пилы осуществляется по команде окончания расчётов суммарных длительностей по всем шести разбиениям. Кроме того, в блоке имеется коммутатор, исключающий подачу новых команд управления до окончания следующего цикла расчётов длительностей в новом периоде несущей.

5. Блок содержит три мультиплексора для управления ключами стоек фаз *A, B, C*. Так, ключ фазы *A* участвует в формировании выходного напряжения при действии вектора напряжения *U1* (100), *U2* (110), *U6* (101). Команда управления фазой *A* для всех шести разбиений имеет вид 110001. Аналогично команда управления фазой *B* имеет вид 011100. Для фазы *C* эта команда – 000111. В каждом из мультиплексоров записаны эти команды.

6. Основными элементами силовой части являются источник питания 500 В и инвертор на идеальных ключах со снабберами. Трёхфазный выход моста подается на преобразователь 3–2 для получения вектора управления в неподвижных координатах  $\alpha\beta$ . К нему подключены блоки визуализации.

7. Модель содержит ряд служебных блоков измерения величин и их визуализации, в том числе графопостроитель годографа усреднённого вектора выходного напряжения.

### Результаты моделирования

На рис.3–5 приведены осциллограммы

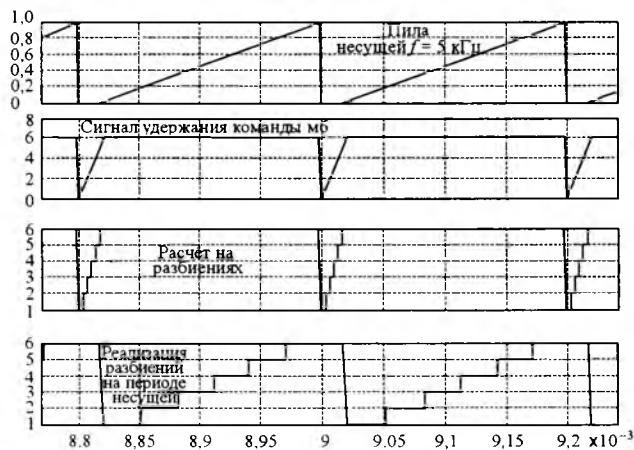


Рис.3  
Вологодская областная универсальная научная библиотека  
www.booksite.ru

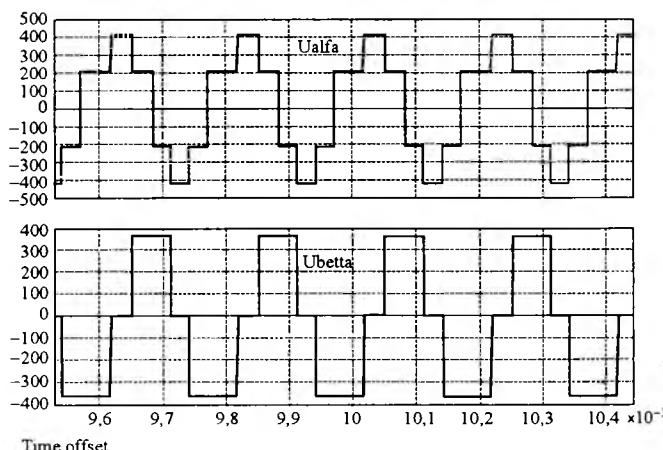


Рис.4

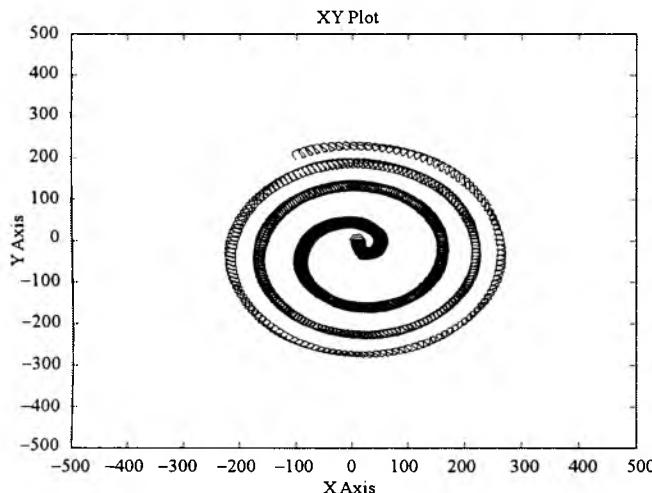


Рис.5

промежуточных сигналов, участвующих в формировании интервалов разбиений, осциллографы выходного напряжения в пределах одного из периодов несущей в процессе имитации частотного пуска двигателя с сохранением закона  $U/f = \text{const}$ , а также годограф усредненного вектора напряжения в процессе пуска.

#### Выводы

- Пояснены все детали реализации рассмотренного симплексного алгоритма.
- Получена модель, которая может быть полезна при формировании массива рассчитанных относительных длительностей для

последующей записи этих значений в программируемую логическую матрицу.

#### Список литературы

- Изосимов Д.Б., Байда С.В.** Алгоритмы векторно-импульсной модуляции трёхфазного автономного инвертора напряжения // Электротехника. 2004. № 4. С.21–31.

**Крутиков Кирилл Кириллович** – доцент кафедры "Теоретические основы электротехники" филиала ГОУВПО "МЭИ (ТУ)" (г.Смоленск), канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1960 г. Диссертацию по теме "Исследование энергетических характеристик инверторной установки фарадеевского магнитогидродинамического генератора" защитил в МЭИ в 1975 г.

**Петрухин Юрий Викторович** – аспирант кафедры "Электромеханические системы" филиала ГОУВПО "МЭИ (ТУ)" (г.Смоленск), магистр техники и технологий. Окончил факультет энергетики и электротехники филиала ГОУВПО "МЭИ (ТУ)" (г.Смоленск) в 2004 г. Магистерскую диссертацию по теме "Исследование частотно-регулируемого привода с автономным инвертором и широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения" защитил в филиале ГОУВПО "МЭИ (ТУ)" (г.Смоленск) в 2004 г.

**Рожков Вячеслав Владимирович** – старший преподаватель кафедры "Электромеханические системы" филиала ГОУВПО "МЭИ (ТУ)" (г.Смоленск), канд. техн. наук. Окончил факультет энергетики и электротехники филиала ГОУВПО "МЭИ (ТУ)" (г.Смоленск) в 2000 г. Диссертацию по теме "Разработка и исследование замкнутых систем и некоторых специальных режимов асинхронного электропривода с фазовым управлением в роторной цепи" защитил в МЭИ в 2004 г.

## Регулируемый электропривод лифтов с асинхронными электродвигателями

АФОНИН В.И., БАЛАБАНОВ И.Н.

В качестве главного привода массовых лифтов применяются асинхронные двухскоростные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Поскольку конкурентоспособность лифтовых приводов на современном рынке определяется его энергетическими и комфорными характеристиками, то улучшение динамических свойств, сокращение потерь энергии и снижение уровня шума при модернизации серийных лифтов и создании новых моделей стало актуальным.

Наиболее массовый, дешёвый и надёжный привод на трёхфазном токе может быть улучшен путём усовершенствования систем регулирования и свойств двигателя.

Приводы, применяемые в лифтовых системах, должны соответствовать ряду требований:

- **удобство передвижения** – движение кабины лифта должно быть плавным, с ограничениями по ускорению и рывкам; рывок определяется изменением ускорения во времени и является важной характеристикой, от которой зависит комфорт передвижения;

– **точность остановки** – при остановке лифта на лестничной площадке требуется высокая точность (например, для больничных лифтов до 2 мм);

– **обратная связь** – в современных системах применяется обратная связь с целью контроля скорости и положения, достижения удобства передвижения и точности остановки;

– **разгон и замедление** – для лифтовых систем характерно большое число пусков и остановок (некоторые системы рассчитаны на 240 пусков в час).

Привод лифта состоит из электрической управляющей схемы, двигателя и механически соединяется с нагрузкой. Скорость и момент привода и нагрузки должны быть всегда равны. Необходимо существование определенных условий стабильности. При наложении характеристик "скорость–момент" привода и нагрузки обычно соблюдаются следующие правила:

– точка "рабочего состояния" – пересечение двух характеристик, когда скорости и моменты привода и нагрузки равны;

– жёсткость характеристики "скорость – момент" нагрузки в точке рабочего состояния должна быть меньше жёсткости кривой "скорость–момент" привода для обеспечения стабильности;

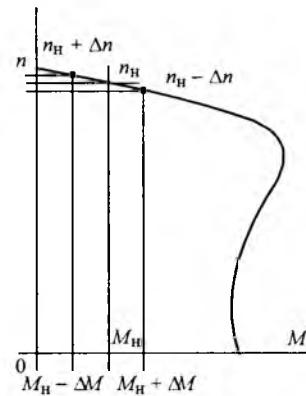
– для обеспечения наилучшей работы пересечение характеристик должно происходить под прямым углом;

– кривая "момент–скорость" привода должна быть как можно ближе к горизонтальному положению.

Снижение зависимости динамических и комфортных характеристик электропривода лифта от меняющейся нагрузки и стабильность достигаются применением замкнутых систем регулирования момента и скорости двигателя.

Как видно из рис.1, увеличение момента нагрузки  $M_n + \Delta M$  приведёт к снижению скорости привода  $n_n - \Delta n$ , а уменьшение момента нагрузки  $M_n - \Delta M$  – к увеличению скорости привода  $n_n + \Delta n$ , т.е. система выйдет из уравновешенного состояния. Эти отклонения фиксируются устройством обратной связи.

Система сравнивает фактическое значение скорости с заданным (эталонным) и разгоняет ( $n_n - \Delta n \rightarrow n_n$ ) или замедляет ( $n_n + \Delta n \rightarrow$



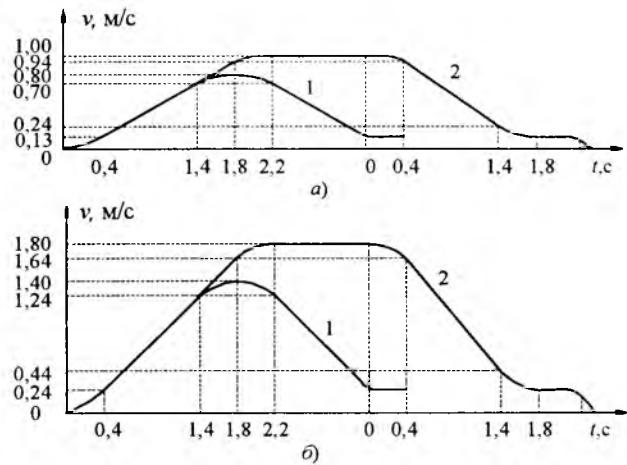
**Рис.1.** Моментные характеристики привода и нагрузки ( $M_n$  – вращающий момент двигателя, соответствующий номинальной нагрузке;  $n_n$  – частота вращения двигателя, соответствующая номинальной нагрузке)

$n_n$ ) двигатель в зависимости от соответствующих значений этих сигналов.

Пример эталонной диаграммы скорости приведён на рис.2.

Система регулирования осуществляет контроль изменения скорости лифта путём отслеживания частоты вращения двигателя. Затем она сравнивает фактическое значение с заданным (эталонным) и разгоняет или замедляет двигатель в зависимости от значений этих сигналов.

Задатчик эталонного значения получает сигналы с вала двигателя или от логического регулятора о различных стадиях цикла работы лифта. Остальные данные получают в процессе ручного регулирования скорости



**Рис.2.** Зависимость скорости лифта от времени:  
а – номинальная скорость 1,0 м/с; б – номинальная скорость 2,0 м/с; 1 – поэтажный разъезд; 2 – разъезд через этаж

разгона, скорости замедления и значений ускорений при разгоне и замедлении.

Перед запуском лифта с помощью индивидуальной настройки устанавливаются требуемые значения. Логический регулятор направляет пусковой сигнал в задатчик эталонного значения, который формирует частоту вращения двигателя, при этом наклон "кривой" скорости перемещения будет соответствовать значению ускорения.

Форма кривой в целом зависит от ручной настройки, в то время как моменты времени, в которые форма кривой изменяется, определяются сигналами от логического регулятора. Система является позиционно зависимой, так как скорость всегда зависит от положения вне зависимости от времени.

Отечественные лифтовые приводы с регулируемой частотой вращения ранее оснащались преимущественно двигателями постоянного тока. Однако благодаря развитию силовой полупроводниковой техники и микроэлектронных систем управления стало возможным применение в редукторных лифтах со скоростью перемещения до 2,0 м/с асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Наличие редуктора позволяет согласовать вращательное движение двигателя и исполнительного механизма.

Объектом исследования являлись лифты грузоподъемностью 400 и 630 кг со скоростью перемещения 1,0 и 1,6 м/с. Испытания

проводились на стенде РУП завод "Могилёвлифтмаш" (Республика Беларусь).

Привод осуществлялся с помощью асинхронных трёхфазных двигателей мощностью 11 кВт (1500 1/мин); 7,5 и 15 кВт (1000 1/мин), регулируемых преобразователем частоты типа SYSDRIVER 3G3FV фирмы "OMRON". Обратная связь по скорости осуществлялась с помощью датчика ET2R-1024/42/30V, размещенного на втором (не рабочем) конце вала. Там же располагался съёмный ручной штурвал (рис.3).

Регулятор скорости содержит константы стандартных двигателей с числом полюсов  $2p = 4$ . При подготовке регулятора к работе параметры двигателей вводятся вручную (табл.1).

Испытания привода лифта 400 кг, 1,0 м/с с двигателем АИРМ 132М6 проводились при поэтажном разъезде: подъём гружёной кабины с 1-го этажа на 2-й и спуск её со 2-го этажа на 1-й; подъём порожней кабины с 6-го этажа на 7-й и спуск её с 7-го этажа на 6-й.

Испытания привода лифта 400 кг, 1,6 м/с с двигателем АИРМ 132М4 проводились с максимальной нагрузкой в режиме подъёма и опускания кабины. Высота подъёма 19,5 м, число остановок 7.

Испытания привода лифта 630 кг, 1,6 м/с с двигателем 5А160М6 проводились с максимальной нагрузкой в режиме подъёма и опускания кабины. Высота подъёма 27,3 м, число остановок 9.

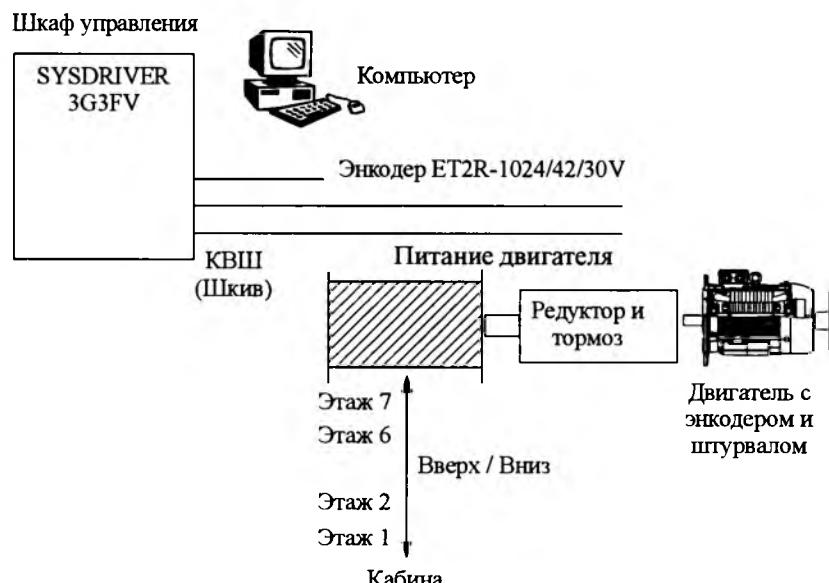


Рис.3. Блок-схема системы управления лифтом

Таблица 1

Параметр	Типоразмер двигателя		
	132M4	132M6	160M6
Номинальная мощность, кВт	11	7,5	15
Число полюсов	4	6	6
Ток ХХ, А	8,1	8,2	12,9
Ток двигателя рабочий, А	15	12,5	28
Скольжение, Гц	2,7	2,9	2,6
Сопротивление обмотки статора между двумя выводами, Ом	0,57	1,12	0,494
Индуктивность рассеяния, %	8,5	7,7	8,4
Коэффициент 1 насыщения сердечника	1,1	1,08	1,08
Коэффициент 2 насыщения сердечника	1,14	1,09	1,1
Коэффициент 3 насыщения сердечника	1,42	1,25	1,31
Механические потери, Вт	130	55	100
Потери в стали статора, Вт	265	220	380

Основные характеристики лифтов, предусмотренные нормативной документацией и полученные при испытаниях, приведены в табл.2.

Из-за сглаживающего действия индуктивного сопротивления рассеяния двигателя его ток, вызванный высокочастотным заполнением

ШИМ, оказывается практически синусоидальным. Суммарный гармонический состав токов менее 5% основной составляющей. Кроме того, токи статора при разгоне и замедлении не превышают двухкратного значения рабочего тока. Все это объясняет сравнительно невысокий нагрев обмоток двигателей (табл.2).

Таблица 2

Характеристика лифта	Грузоподъёмность, кг, и скорость перемещения, м/с, лифта		
	400, 1,0	400, 1,6	630, 1,6
Мощность, кВт	7,5	11	15
Частота вращения, 1/мин	1000	1500	1000
Скорость перемещения (задано / факт), м/с:			
– рабочая	0,85–1,15/1,02	1,36–1,84/1,84	1,36–1,84/1,62
– доводочная	<0,25/0,069	<0,4/0,185	<0,4/0,165
Перегрев обмотки статора, °C	<50	67,3	69,3

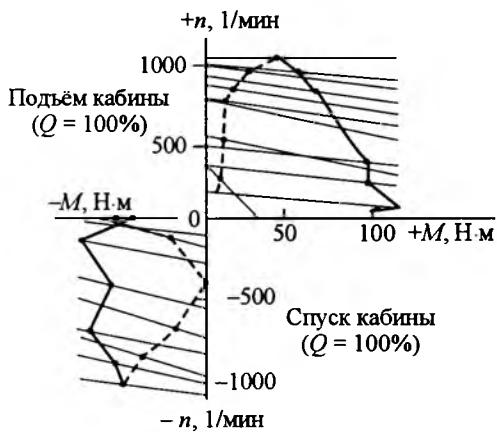


Рис.4. Диаграмма "скорость–момент" при подъёме /спуске уравновешенной кабины пассажирского лифта 400 кг, 1,0 м/с:

— разгон; - - - — замедление

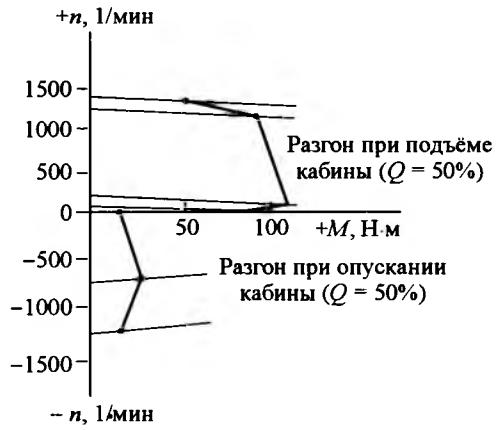


Рис.5. Диаграмма "скорость–момент" при подъёме /спуске уравновешенной кабины пассажирского лифта 400 кг, 1,6 м/с

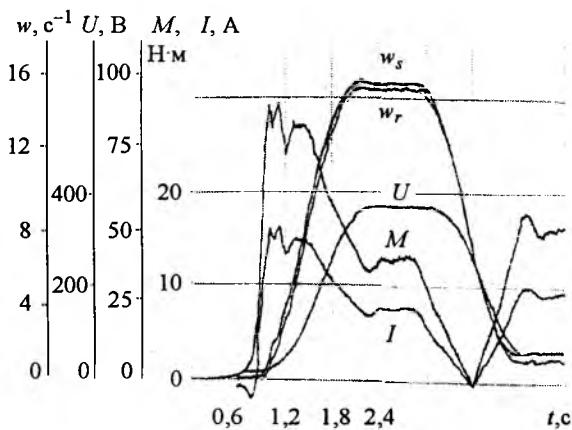


Рис.6. Опускание порожней ( $Q = 0\%$ ) кабины с 7-го на 6-й этаж (противовес внизу)

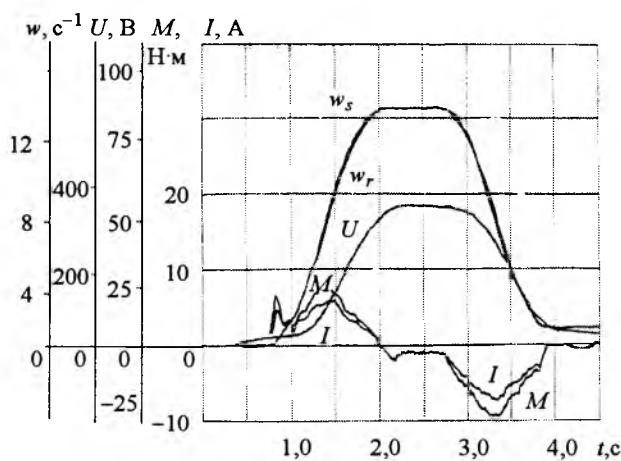


Рис.7. Опускание гружёной ( $Q = 100\%$ ) кабины со 2-го на 1-й этаж (противовес вверху)

Высокая точность остановки достигается снижением доводочной скорости примерно в 15 раз относительно рабочей скорости.

Диаграммы "скорость–момент" двигателей 7,5 и 11 кВт приведены на рис.4 и 5.

В процессе испытаний лифта 400 кг, 1,0 м/с с помощью компьютера были вычислены и воспроизведены зависимости напряжения  $U$ , тока  $I$  и частоты  $w_s$  на выходе инвертора SYSDRIVE 3G3FV (400В, 5,5 кВт), скорости  $w_r$  и врашающегося момента  $M$  на валу двигателя АИРМ 132М6 в процессе разгона, движения с установившейся скоростью и замедления лифта при опускании порожней кабины из верхнего положения (рис.6) и при опускании гружёной кабины при нахождении внизу (рис.7).

Создаваемый типоразмерный ряд и его основные характеристики приведены в табл.3.

### Выводы

- С частотно-регулируемым приводом применяемые двигатели обеспечивают заданные моменты при любой скорости, совместимой с частотами инвертора.

- Использование частотного регулирования на лифтах даёт ряд преимуществ для потребителей:

- безопасность** – обеспечивается гарантированная точность остановки  $\pm 5$  мм; перемещение кабины плавное без резких толчков и остановок;

- качество и комфорт** – улучшение комфорта при движении независимо от загрузки кабины; низкий уровень шума при работе лифта; возможность быстро заменить программу управления для лучшей адаптации к нуждам потребителя;

- надёжность** – перемещение кабины более плавное и остановка регулируется не тормозом,

Таблица 3

Грузоподъёмность лифта, кг	400	400	400	630	1000
Скорость перемещения, м/с	1,0	1,6	1,0	1,6	1,6
Типоразмер двигателя	132S4	132M4	132M6	160M6	180M6
Момент статической нагрузки, Н·м	36,5	53,5	50,0	125,0	170,0
Частота вращения, 1/мин, не менее	1470	1450	970	970	970
Ток статора, А	10,5	15,0	12,5	28,0	37,0
Коэффициент мощности, о.е.	0,78	0,80	0,60	0,80	0,84
Начальный пусковой врачающий момент, Н·м	95–115	170–200	160–200	250–300	300–360
Число циклов в час	150	180	180	200	200
Момент инерции ротора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,032	0,045	0,067	0,150	0,240
Масса двигателя, (IM3082), кг	70	84	82	150	180

\*Параметры соответствуют моменту статической нагрузки.

а изменением частоты и напряжения; оборудование меньше подвержено износу; микропроцессорная технология позволяет сократить количество деталей, что в свою очередь ведёт к сокращению сбоев в работе лифта; наличие постоянной диагностики системы обеспечивает быстрый анализ сбоев и сокращает простоя кабины.

3. Внедрение частотно-регулируемых электроприводов целесообразно как на новых лифтах, так и на действующих.

**Афонин Валерий Иванович** – ведущий научный сотрудник ОАО "НИПТИЭМ". Окончил факультет электро-механики МЭИ в 1967 г., канд. техн. наук. Защищил диссертацию по теме "Исследование и вопросы проектирования двухскоростных асинхронных двигателей для привода лифтов" в 1979 г.

**Балабанов Игорь Николаевич** – главный конструктор по перспективным разработкам РУП "Завод Могилёв-лифтмаш" (г. Могилёв, республика Беларусь). Окончил Могилёвский машиностроительный институт в 1980 г. по специальности инженер-системотехник.

## Современный электропривод скоростных лифтов повышенной комфортности

МАКАРОВ Л.Н.

*Рассмотрены варианты исполнения электроприводов лифтов и особенности безредукторного частотно-регулируемого электропривода с низкоскоростным асинхронным двигателем.*

В настоящее время в стране насчитывается свыше 400 тыс. лифтов, срок службы 60% из них превысил или близок к 25 годам – предельно допустимому периоду эксплуатации. Учитывая это, а также рост нового строительства домов повышенной этажности, особенно в городах с населением около и свыше 1 млн. человек, спрос на лифты, особенно скоростные (1,6 – 3 м/с), постоянно возрастает.

Проблему лифтового привода фактически можно разделить на два самостоятельных направления:

1. Приводы лифтов для домов нового строительства не выше 9 этажей и приводы для замены отслуживших свой срок в домах старой постройки.

2. Приводы лифтов для домов от 12 до 40 этажей и выше, а также для административных зданий.

Первую группу составляют низкоскоростные лифты (0,5 – 1 м/с) стандартной грузоподъёмности от 250 до 1500 кг для ЖКХ. Их приводы имеют низкую стоимость и используют двухскоростные двигатели с отношени-

*Variants of execution of electric drives of lifts are considered and features without reducer is frequency-adjustable the electric drive with low speed the asynchronous engine.*

ем скоростей 4/16, 6/18, 6/24, 4/24 и лифтовый червячный редуктор.

К второй группе относятся лифты на скорости от 1,6 до 4 м/с. Отечественной промышленностью лебедки на скорости выше 1,6 м/с пока практически не выпускаются, и для комплектации высотного строительства применяют в основном скоростные лифты передовых фирм "OTIS", "KONE" и др.

### Электропривод низкоскоростных лифтов

В отечественных лифтах применяются в основном лебедки, изготавливаемые Карабаровским механическим заводом (КМЗ), Могилёвским лифтостроительным заводом, заводом "ОТИС-Лифт" (г. Щербинка), "Уралтрансмаш" (Екатеринбург).

Наиболее удачными являются лебедки, производимые заводом "ОТИС-Лифт". Это три лебёдки, рассчитанные на скорость 1 м/с и грузоподъёмность 400, 630 и 1000 кг. Червяк редуктора расположен вертикально и на выходном конце червяка насаживаются консольный ротор двигателя, маховик-тормоз и вентилятор. Двигатель имеет  $Z_1 = 48$  пазов на ста-

торе,  $Z_2 = 72$  паза на роторе. Ротор двигателя весьма сложен в изготовлении за счёт большого количества пазов, имеющих высоту 16 мм и ширину 2 мм в верхней части на глубине 9 мм. Такая конфигурация паза нетехнологична – низкая стойкость оснастки и плохая проливаемость ротора.

В данном двигателе соотношение  $Z_1 < Z_2$  принято из соображений повышения  $M_{\max}$  на низкой скорости и созф, поскольку из-за консольного монтажа ротора воздушный зазор двигателя в два раза превышает воздушный зазор обычного двигателя.

Опыт эксплуатации такой конструкции показал, что при работе с частыми пусками и реверсами по истечении времени двигатели начинали терять максимальный момент на малой скорости в генераторном режиме, что нарушило правильную работу лифта. Обычным тестированием машин не удавалось определить причину данного явления. Явных нарушений обмоток ротора и статора выявить было невозможно.

Более тщательные исследования показали, что в результате частых температурных перепадов, которые обычно наблюдаются у двигателей, работающих с частыми пусками-реверсами (для лифтового привода требуется 150–200 пусков в час), происходит увеличение переходного сопротивления между стержнями ротора и железом. При определённых условиях это сопротивление достигает критического значения, при котором добавочные потери при скосе пазов ротора и  $Z_2 > Z_1$  достигают максимального значения и за счёт этого возникают тормозные моменты, уменьшающие  $M_{\max}$ .

Данный недостаток удалось ликвидировать введением дополнительного короткозамкнутого кольца в середине ротора, что стабилизировало переходное сопротивление и соответственно максимальный момент в генераторном режиме.

Режим работы асинхронного двигателя в системе лифтового привода достаточно сложен. Он должен обладать индивидуальными параметрами, обеспечивающими требуемый режим разгона, движения и торможения, поскольку является приводом устройства, предназначенного для перемещения людей.

Проведенные расчёты позволили найти для всего типажа выпускаемых в настоящее

Таблица 1

Сочетание полюсов	Ряд мощностей (для высокой скорости), кВт
4/16	3,5; 4,0; 5,0; 7,5; 9,0; 10,5; 12,0; 13,0
6/18	3,0; 3,5
6/24	3,0; 3,5; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0; 12,0; 13,0; 17,5

время лифтов сочетания чисел полюсов и мощностей, приведённые в табл. 1.

При разработке всего ряда необходимых электродвигателей нами использовались магнитные системы серийных двигателей обычного исполнения с применением специальной формы пазов. Поскольку ротор при отношении скоростей 1/4 работает в большом диапазоне частот от 0 до 150 и в каждом режиме требуется обеспечение необходимых параметров, паз ротора должен иметь сложную форму. Большие возможности в совершенствовании двигателей для лифтов открываются с применением чередующихся пазов ротора. Поскольку в литературе нет достаточно хорошо разработанных методик по расчёту данного вида пазов, они были нами исследованы и осуществлялась разработка конструкций роторов с чередующимися пазами.

Таким образом, в лифтовых двухскоростных электродвигателях ротор имеет специальную конструкцию, обеспечивающую большие активное и реактивное сопротивления с целью получения малых значений пусковых токов при больших пусковых моментах. Роторы, кроме того, заливаются сплавом повышенного сопротивления. Всё это приводит к низким значениям КПД, созф и повышенному расходу активных материалов.

#### Частотно-регулируемый электропривод

Наиболее прогрессивным является частотный привод с применением односкоростных электродвигателей. Его основные преимущества:

- дешёвый двигатель благодаря использованию пазовой зоны только для одной обмотки;

- срок службы и надёжность таких лебедок значительно выше традиционных, поскольку вся система привода обеспечивает идеальный S-образный режим разгона и торможения, все механические конструкции не испытывают излишних электродинамических нагрузок; двигатели разгоняются и тормозят-

ся при токах в несколько раз меньших, чем при двухскоростном исполнении;

– тормозная система фактически не изнашивается, поскольку тормозные колодки накладываются на тормозной диск при частотах вращения электродвигателя, близких к нулю.

Такая система стала использоваться всё чаще несмотря на то, что из-за наличия преобразователя повышается цена электропривода. Но эти вложения окупаются за счёт экономии электроэнергии до 70%, повышения комфорта лифта, роста надёжности и срока службы.

Учитывая тенденцию снижения стоимости электронных преобразователей частоты и повышения стоимости активных материалов, из которых изготавливаются электродвигатели, данные системы будут развиваться интенсивно.

Частая ошибка производителей лебедок, использующих в приводе преобразователи частоты, состоит в том, что они применяют обычные двухскоростные лифтовые машины и подключают только обмотку большой скорости. В некоторых случаях ("ОТИС-Лифт") изготавливают новый двигатель с одной обмоткой, но оставляют старый ротор и пакет статора. Это позволяет поднять мощность, но такой двигатель не отвечает требованиям, предъявляемым к системе преобразователь частоты – двигатель. Обмотка рассчитана на номинальное напряжение (например 380 В), хотя при соединении с ПЧ из-за падения напряжения в контуре преобразователя оно может упасть до 370–360 В, т.е. машина будет работать с ослабленным потоком. Это в свою очередь приводит к потере КПД, увеличению тока, росту скольжения, повышению перегревов и увеличению нагрузки на преобразователь частоты; в некоторых случаях приходится увеличивать его установленную мощность на ступень. Ситуацию усугубляет ротор, выполненный с параметрами под двухскоростной вариант, имеющий увеличенные значения активного и реактивного сопротивлений. Это приводит к дальнейшему ухудшению параметров привода.

В идеале двигатель лифтового привода, рассчитанный на работу с преобразователем частоты, должен иметь простые овальные

пазы, залитые чистым алюминием или круглые с медными стержнями. Кроме того, обмотка двигателя должна выполняться из материалов, противостоящих перенапряжениям, возникающим из-за наличия в системе преобразователь – двигатель высокочастотных импульсов ШИМ.

Слабым звеном в лебедке, применяемой для лифтов, является червячный редуктор повышенной точности. КПД самого хорошего червячного редуктора в номинальном режиме не более 75%, а в процессе пуска составляет 50–60%. Повышенные потери приводят к износу контактных поверхностей, нагреву масла и подшипников. Наличие масла создает также экологические проблемы. Еще большие проблемы возникают при необходимости изготовления приводов для скоростных лифтов: 1,6–4,0 м/с.

### **Электроприводы с ременной передачей**

Известна тенденция использования в электроприводе лифтов ременных передач. Выполненные нами проработки показывают, что применение частотно-регулируемого электропривода с ременной передачей для лифтов со скоростью движения до 1 м/с позволяет применить шестиполюсные и восьмиполюсные двигатели, по конструкции близкие к серийным машинам.

Область применения данных приводов – лифты жилых домов со скоростью 1 м/с и грузоподъёмностью 320, 400, 630 кг.

Однако в мировой практике этот вид привода получил незначительное применение, поскольку нет опыта по наработке на отказ, и у эксплуатационников применение ременных передач вызывает некоторые сомнения. Кроме того, ременная передача создаёт значительные радиальные усилия на подшипниковый узел и вал двигателя, превосходящие усилия в обычных серийных машинах общего применения. Поэтому двигатели для данного вида привода должны быть специально рассчитаны на повышенные радиальные нагрузки. Обмотка двигателя должна соответствовать выбранному номинальному режиму, а сам двигатель должен иметь увеличенный воздушный зазор, чтобы разгрузить вал от сил одностороннего магнитного притяжения.

**Безредукторные электроприводы**

Принципиально новые возможности открываются с применением для лифтов безредукторных электроприводов. Такие электроприводы, получающие в последнее время широкое применение, содержат:

- низкоскоростной, высокомоментный двигатель с инкрементальным датчиком;
- канатоведущий шкив;
- тормозное устройство;
- преобразователь частоты.

Идеальным решением для этих целей, что подтверждается мировой практикой, является вентильный многополюсный (до  $2p = 24$ ) двигатель, выполненный с применением магнитов из редкоземельных материалов Nd-Fe-B или Sm-Co (СДПМ). Такие двигатели выполняются с номинальным моментом до 1500 Н·м при изменении частоты вращения от 0 до 300 об/мин. Это обеспечивает применение приводов для самого востребованного диапазона скоростей и нагрузок от 1 до 3 м/с и грузоподъёмности до 1000 кг.

Эти двигатели имеют один недостаток – высокую цену, а с применением более дешёвых магнитов на основе Nd-Fe-B, под воп-

росом остаётся их жизнеспособность в течение длительного срока эксплуатации (для лифта 25 лет) при жёстких воздействиях переменных магнитных полей; по данным отдельных источников после 10-летней эксплуатации данные магниты теряют в массе до 3–5%, что приводит к снижению работоспособности машины.

Ярославский электромашиностроительный завод совместно с Карабаровским механическим заводом в течение 5 лет проводит работы по исследованию и внедрению безредукторных приводов с использованием асинхронного двигателя – (рисунок, табл.2). Успешно аттестованы приводы для лифтов скоростью 1,6 м/с и грузоподъёмностью 400, 630 и 1000 кг, начато их серийное производство.

Совместно с Щербинским лифтостроительным заводом заканчивается освоение лифтов на скорость до 2,5 м/с, имеется проект для лифтов до 4 м/с. Основные характеристики лебедок приводятся в табл.3. По всем параметрам, за исключением массогабаритных показателей, они соответствуют лебёдкам, использующим СДПМ, но по цене значительно дешевле. Однако за счёт применения специальных конструкций АД имеет-

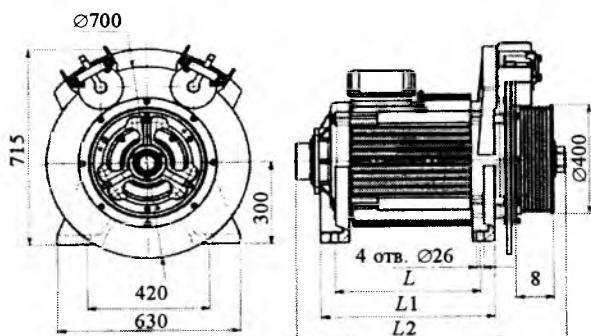


Таблица 2

Размеры, мм	Грузоподъёмность, кг		
	400	630	1000
<i>L</i>	390	500	570
<i>L</i> 1	487	597	667
<i>L</i> 2	816	926	1036

Таблица 3

Скорость, м/с	Грузоподъ- ёмность, кг	<i>M</i> <sub>ном</sub> , Н·м	<i>M</i> <sub>макс</sub> , Н·м	<i>n</i> <sub>ном</sub> , об/мин	<i>P</i> <sub>ном</sub> , кВт	<i>I</i> <sub>ном</sub> , А	<i>I</i> <sub>макс</sub> , А	КПД, %	Масса, кг
1,6	400	300	525	160	5	15	32	77	624
	630	439	765		7,4	20	40	80	689
	1000	690	1175		12	28	55	81	836
2,0	400	300	525	200	6,3	19	40	78	624
	630	440	765		9,2	24	49	81	689
	1000	690	1175		14,3	32	65	85	836
3,0	400	300	525	300	9,4	25	50	82	624
	1000	690	1175		21,3	46	93	87	836
4,0	1000	750	1300	400	30,5	64	102	90	836

ся возможность получить габаритные размеры, близкие к размерам СДПМ.

Двигатели для безредукторного привода стремятся сделать максимально возможного диаметра при минимально достижимой аксиальной длине, поскольку сейчас востребованы лебедки для безмашинного помещения, что позволяет значительно снизить стоимость нового строительства. В таких СДПМ недоиспользовано внутреннее пространство ротора, поэтому некоторые производители даже используют его для размещения тормозной системы, но при этом конструкция усложняется, цена возрастает.

Создание низкоскоростного высокомоментного АД стало возможным благодаря изучению всех особенностей, которые возникают при питании АД от преобразователей частоты на низких частотах. Это потребовало создания специальной методики расчёта двигателей во всём диапазоне изменения частоты вращения и динамических нагрузок. Были сформулированы основные требования к конструкции ротора, обмоток статора и расчёту магнитной системы. Изучена работа АД в области высоких насыщений магнитной системы. Для каждого привода рассчитывался оптимальный вариант сочетания двигатель-преобразователь из условия минимальной стоимости при получении необходимых параметров. Большое внимание уделялось показателям надёжности и увеличению срока службы привода.

Обмотки статора рассчитывались на низкие плотности тока с целью повышения об-

щего КПД системы, снижения установленной мощности преобразователя как наиболее дорогостоящей части привода, что также позволяло отказаться от принудительной вентиляции. Отсутствие внешнего вентилятора, как наиболее ненадёжного элемента, повышает надёжность системы в целом.

Все конструктивные элементы двигателей были выполнены из высокопрочного чугуна.

Вал и подшипники рассчитывались на долговременную работу (50000 ч).

Количество пар полюсов, конструкция пазовой зоны ротора, соотношения пазов статор-ротор выбирались из расчёта повышения энергетических характеристик машин, а также исключения шумов и вибраций магнитного происхождения.

Система изоляции проектировалась для обеспечения надёжной работы двигателя от преобразователя частоты.

Были выбраны дисковые тормоза, рассчитанные на удвоенный номинальный момент привода и обеспечивающие длительный срок эксплуатации, поскольку они затормаживают тормозной диск при нулевой скорости и в процессе работы не изнашиваются.

Дальнейшие исследования и изучение опыта эксплуатации позволит значительно рационализировать всю систему безредукторного привода с использованием низкооборотных высокомоментных АД.

**Макаров Лев Николаевич** – заместитель генерального директора по науке ОАО "Ярославский электромашиностроительный завод", канд. техн. наук.

## Ввод в эксплуатацию управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора мощностью 180 МВ·А, 500 кВ

БРЯНЦЕВ А.М., ДОЛГОПОЛОВ А.Г., ЛУРЬЕ А.И., БАЗЫЛЕВ Б.И., УКОЛОВ С.В., ЗАЙЦЕВ А.И., СОКОЛОВ Ю.В., АХМЕТЖАНОВ Н.Г.

Введением в эксплуатацию нового уникального УШР 500 кВ завершён первый этап внедрения УШР классов напряжения 110, 220, 330 и 500 кВ. В настоящее время вопрос о целесообразности расширения внедрения УШР можно ставить не в теоретической, а в чисто практической плоскости, опираясь на уже имеющийся и с каждым днём увеличивающийся успешный опыт эксплуатации 9 реакторов этого типа.

*The first stage of application of CShR with voltage 110, 220, 330 and 500 kW was closed with putting into the operation the new unique CShR 500 kW.*

*In the present time we can put a question about advisability of expansion the CShR application not in theoretical level, but in purely practical level, relying on successful and increasing exploitation experience of 9 reactors of this type.*

В конце 2005 г. введены в эксплуатацию управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШР): трёхфазный мощностью 63 МВ·А, 110 кВ типа РТУ-63000/110 на подстанции "Советск" МЭС Северо-Запада, трёхфазный мощностью 100 МВ·А, 220 кВ типа РТУ-100000/220 на подстанции "Хабаровская" МЭС Востока и реактор пофазного исполнения мощностью 180 МВ·А, 500 кВ типа РТУ-180000/500 на подстанции "Таврическая" МЭС Сибири.

Многолетние исследования, закончившиеся разработкой, успешными заводскими и сетевыми приёмо-сдаточными испытаниями и введением в эксплуатацию 14 декабря 2005 г. УШР типа РТУ-180000/500 – это существенный момент в развитии отечественной энергетики. Впервые на ЛЭП 500 кВ (как в РФ, так и за рубежом) начал эксплуатацию управляемый шунтирующий реактор.

В течение многих десятилетий прошедшего века в нашей стране и за рубежом проводились многочисленные теоретические и экспериментальные исследования по созданию управляемых подмагничиванием реакторов различных типов (Либкинд М.С., Бамдас А.М., Беккер Х., Крамер В., Фридлендер Е.Д. и др.), однако распространения такие реакторы не получили (из-за сложности конструк-

ции, больших масс, габаритов и потерь). В последние два десятилетия положение резко изменилось: УШР начали интенсивно внедряться в электрических системах. Это связано как с увеличением потребности в простых в изготовлении и эксплуатации, надёжных регулируемых потребителях реактивной мощности, так и с развитием теории процессов в УШР, предложением новых конструкций и устройств управления [1]. Введением в эксплуатацию УШР 500 кВ завершён первый наиболее трудный этап внедрения УШР всех классов напряжения 110, 220, 330 и 500 кВ.

В настоящее время вопрос о целесообразности расширения внедрения УШР можно ставить не в теоретической, а в чисто практической плоскости, опираясь на уже имеющийся и с каждым днём увеличивающийся опыт их эксплуатации. Основанием для такого утверждения является тот факт, что в различных энергосистемах работают 9 мощных УШР 5 типов:

- ◆ РТУ-25000/110 на подстанции "Кудымкар" Пермэнерго, введён в эксплуатацию в сентябре 1999 г.;
- ◆ РТУ-25000/110 на подстанции "Игольская" Васюганского региона ОАО "Томскнефть", введён в эксплуатацию в июле 2004 г.;

◆ РТУ-25000/110 на подстанции "Двуреченская" Васюганского региона ОАО "Томскнефть", введён в эксплуатацию в сентябре 2004 г.;

◆ РТУ-25000/110 на подстанции "Катыльгинская" Васюганского региона ОАО "Томскнефть", введён в эксплуатацию в ноябре 2004 г.;

◆ РТУ-63000/110, введён в эксплуатацию в декабре 2005 г. на подстанции "Советск" МЭС Северо-Запада;

◆ РТУ-100000/220 на подстанции "Чита" МЭС Сибири, введён в эксплуатацию в апреле 2002 г.;

◆ РТУ-100000/220 на подстанции "Хабаровская" МЭС Востока, введён в эксплуатацию в декабре 2005 г.;

◆ РТУ-180000/330 на подстанции "Барановичи" Брестэнерго (Белоруссия), введён в эксплуатацию в июле 2003 г.;

◆ РТУ-180000/500 (трёхфазная группа реакторов типа РОДУ-60000/500), введён в эксплуатацию в декабре 2005 г. на подстанции 500 кВ "Таврическая" МЭС Сибири.

Разработка и пуск в эксплуатацию реактора РТУ-180000/500, как и всех других УШР, выполнена научно-инженерным центром ОАО "Электрические управляемые реакторы" ("ЭЛУР"), производителями оборудования, входящего в состав управляемого реактора, являются ОАО "Запорожтрансформатор" (электромагнитные части реактора), ООО "Энергия-Т", г. Тольятти, (тиристорные преобразователи и система автоматического управления).

#### **Основные технические параметры управляемого реактора, подтверждённые заводскими и сетевыми испытаниями**

##### **Номинальная мощность**

$Q_{\text{ном}}$ , МВ·А .....  $60000 \times 3 = 180$

Диапазон плавного регулирования

мощности, %  $Q_{\text{ном}}$  ..... 5–130

Номинальное напряжение  $U_{\text{c,ном}}$ , кВ ..... 525

Наибольшее рабочее напряжение, кВ ..... 550

Номинальный ток сетевой обмотки  $I_{\text{ном}}$ , А ..... 198

Номинальное напряжение обмотки управления на вводах переменного напряжения, кВ ..... 32

Номинальный ток подмагничивания обмотки управления (ток подмагничивания), А ..... 2000

Минимальное время набора мощности

5–100%  $Q_{\text{ном}}$  и сброса мощности

100–5%  $Q_{\text{ном}}$ , с ..... 0,3

Суммарные (полные) потери при  $Q_{\text{ном}}$  и  $U_{\text{c,ном}}$ , %  $Q_{\text{ном}}$  ..... 0,5

Эксплуатационные потери при коэффициенте суточной нагрузки 0,7, %  $Q_{\text{ном}}$  ..... 0,3

Ток любой высшей гармонической составляющей:

– при  $U_{\text{c,ном}}$ , %  $I_{\text{ном}}$ , не более ..... 3

– при  $U_{\text{c,ном}}$  и  $Q_{\text{ном}}$ , %  $I_{\text{ном}}$ , не более ..... 1

Корректированный уровень звуковой мощности, дБА, не более ..... 108

Двойная амплитуда вибрации стенки бака, среднее значение, мкм, не более ..... 150

Превышение температуры верхних слоёв масла над воздухом, °С, не более ..... 60

Статизм регулятора системы автоматического управления (САУ)

по напряжению, %  $U_{\text{c,ном}}$  ..... 1–5

Диапазон изменения уставки регулятора по напряжению, кВ ..... 500–525

Точность задания уставки, %  $U_{\text{c,ном}}$  ..... 0,3

Диапазон изменения уставки по току сетевой обмотки, А ..... 0–250

Допустимая перегрузка по току сетевой обмотки (не более 30 мин), %  $I_{\text{ном}}$  ..... 120

Напряжение КЗ СО–ОУ, % ..... 50

Режим работы

автоматическая стабилизация напряжения на шинах 500 кВ;

автоматизированное поддержание заданного тока;

ручное регулирование потребляемой мощности и сетевого тока.

Эти и другие технические параметры находятся в пределах, нормируемых по утверждённым техническим условиям. При прёмо-сдаточных пусковых испытаниях в сети 500 кВ опробована работа в ручном режиме регулирования тока реактора и автоматическом режиме поддержания напряжения в суточном графике с заданным статизмом 1 и 2%. Налажен и опробован канал автоматического поддержания заданного оператором тока реактора с астатическим законом регулирования. Проверен режим допустимой 20%-й перегрузки в течение 30 мин.

Обобщённая электрическая схема реактора показана на рис. 1.

Основными силовыми элементами УШР типа РТУ-180000/500 являются три электромагнитные части типа РОДУ-60000/500, каждая из которых представляет собой однофаз-

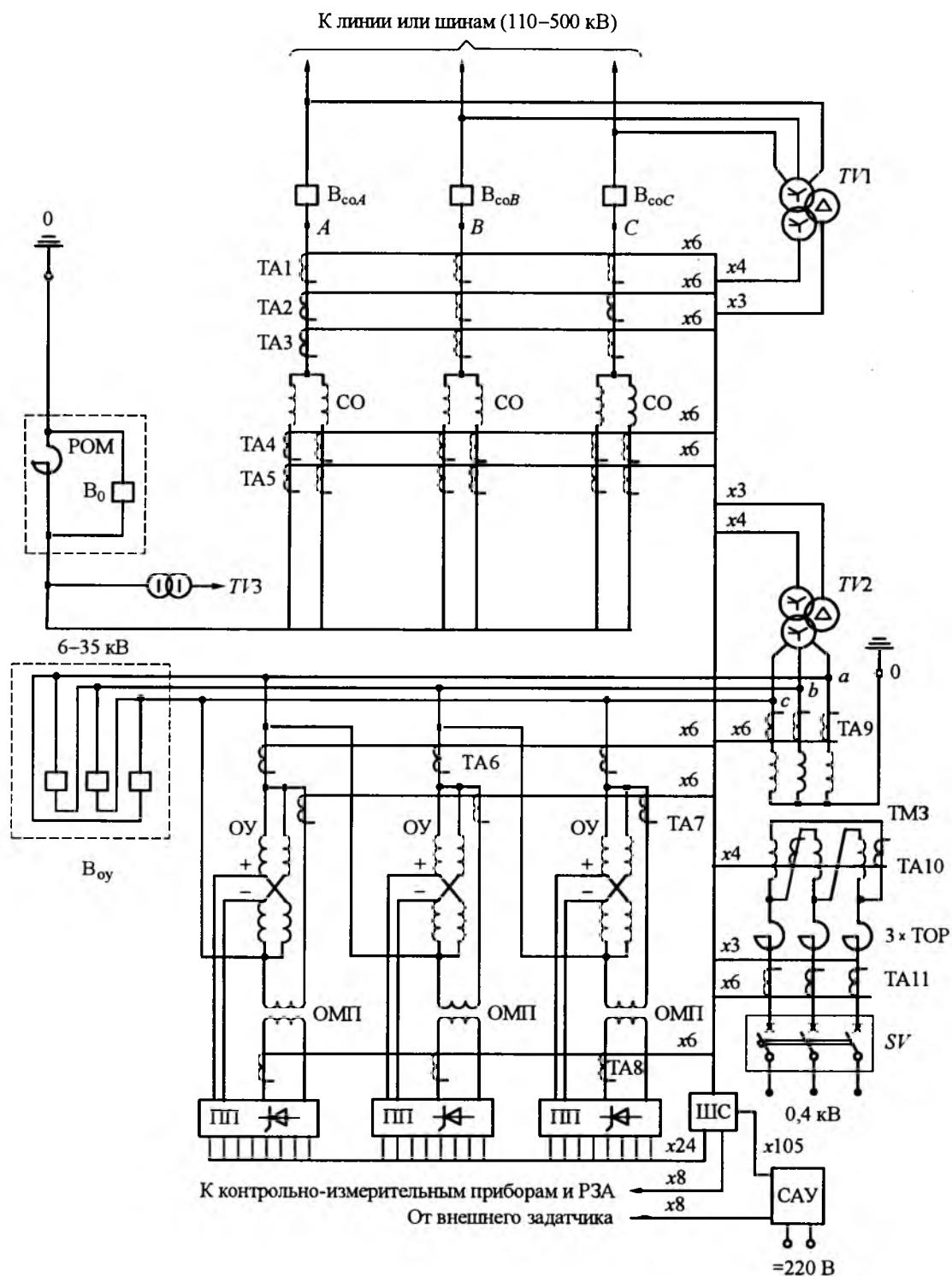


Рис.1. Обобщённая электрическая схема реактора РТУ-180000/500:

СО – сетевые обмотки; ОУ – обмотки управления; ОМП – преобразовательный трансформатор; ПП – полупроводниковый преобразователь; ТМ3 – трансформатор с токоограничивающим реактором ТОР в каждой фазе; ШС – шкаф соединений; ТА1 – ТА11 – трансформаторы тока; САУ – система автоматического управления; РОМ – реактор в нейтрали СО; выключатели:  $B_{co}$  – сетевой;  $B_{oy}$  – обмотки управления (применяется при гашении тока дуги в паузе ОАПВ или при кратковременной двукратной перегрузке реактора по мощности);  $B_0$  – шунтирующий реактор в нейтрали СО, применяется при гашении тока дуги в паузе ОАПВ; Втмз – выключатель с автоматическим срабатыванием максимального тока (нормально отключён); SV – контактор;  $TV_1$  –  $TV_3$  – трансформаторы напряжения

ное электромагнитное устройство трансформаторного типа, размещённое в маслонаполненном баке. Исполнение – для наружной установки. Магнитопровод каждой электромагнитной части – однофазный броневой, имеются сетевая обмотка, обмотки управления. Обмотки управления трёх электромагнитных частей РОДУ-60000/500 соединены внешней ошиновкой в треугольник. При закорачивании треугольника обмоток управления выключателем 35 кВ В<sub>0</sub> реактор может быть переведён без задержки по времени в кратковременный режим работы нерегулируемого реактора с мощностью 200% по отношению к номинальной мощности, т.е. 360 МВ·А.

Номинальная мощность трансформатора ОМ питания преобразователя ПП в цепи подмагничивания менее 1% номинальной мощности реактора. Каждый трансформатор ОМ размещается внутри бака электромагнитной части, а преобразователь ПП – в масляном навесном баке. Это выгодно отличает УШР от "конкурирующих" вариантов – СТК, ТРГ и управляемого реактора трансформаторного типа (УШРТ), мощность тиристорного преобразователя у которых соответствует полной мощности установки, причём преобразователь должен располагаться в специальном закрытом отапливаемом помещении, при этом возникают существенные потери в самом преобразователе, необходима более сложная и неудобная в эксплуатации водяная система охлаждения.

Маломощный трёхфазный трансформатор для предварительного подмагничивания ТМЗ и токоограничивающие реакторы ТОР размещены в отдельном баке с трансформаторным маслом.

Система автоматического управления (САУ) – электронное устройство на базе микропроцессоров, выполненное в виде шкафа и размещённое в помещении щита управления подстанции. Реактор РТУ-180000/500 работает с системой мониторинга его основных параметров. Внешний вид реактора на подстанции "Таврическая" показан на рис.2.

Реактор РТУ-180000/500, как и другие реакторы серии РТУ, соответствует ТУ, разработанным и согласованным организациями и институтами РАО "ЕЭС России", утверждённым руководством ОАО "ФСК ЕЭС", а так-

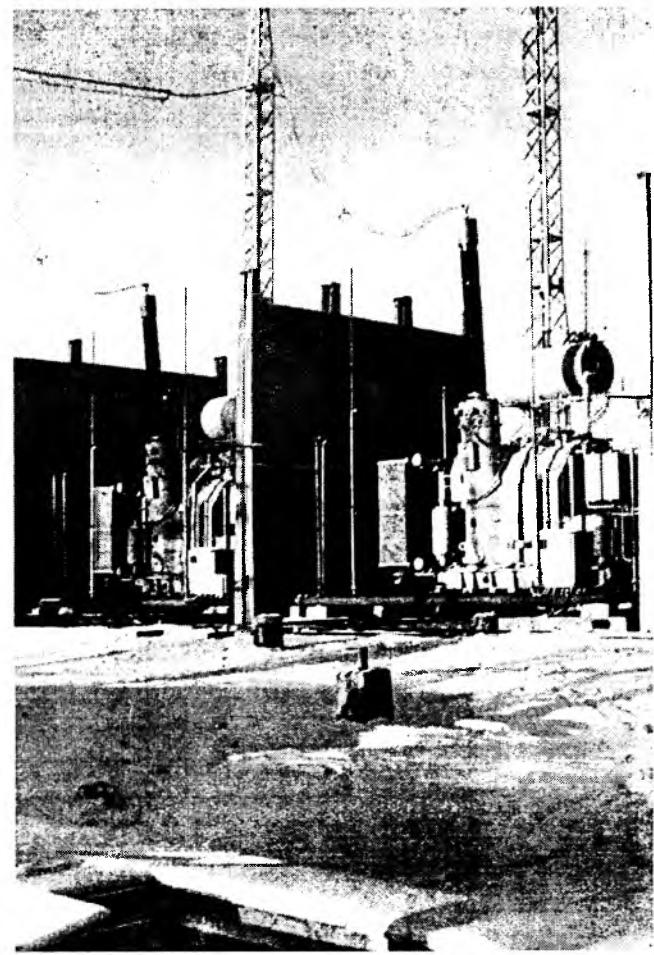


Рис.2. Реактор РТУ-180000/500 на подстанции "Таврическая"

же рекомендациям энергообъединений стран СНГ и дальнего зарубежья.

На серию реакторов РТУ в установленном порядке разработаны, согласованы, утверждены и впервые с 16.04.2004 г. введены в действие Общие технические условия ТУ 3411-001-53950285-2004 "Реакторы управляемые трёхфазные масляные тип РТУ мощностью от 32000 до 180000 кВ·А классов напряжения 110, 220, 330 и 500 кВ".

Наглядным примером эффективности применения управляемых реакторов серии РТУ являются результаты эксплуатации УШР **РТУ-25000/110 на подстанции "Кудымкар"**. За счёт установки реактора колебания напряжения в точке подключения ограничены  $\pm 1,5\%$  относительно напряжения уставки при одновременном сокращении числа коммутаций батареи конденсаторов (БСК) и РПН трансформаторов примерно в 100 раз. В часы

максимума графика нагрузки потери энергии в прилегающей сети снижены на 2,0 МВт, что обеспечивает окупаемость реактора менее, чем за три года. Обеспечено бесперебойное электроснабжение потребителей Коми-Пермяцкого автономного округа, что позволило отложить строительство линии 220 кВ на север Пермской области на 10–15 лет.

Эффективной оказалась и эксплуатация трёх реакторов РТУ-25000/110 на подстанциях Сибири "Двуреченская", "Катыльгинская", "Игольская" нефтедобывающих предприятий. Автоматическая стабилизация напряжения с самого начала эксплуатации реакторов привела, в частности, к резкому (на порядок) снижению случаев отключения импортного оборудования из-за колебаний напряжения в сети, к существенному снижению потерь добычи нефти. После ввода на подстанциях "Игольская" и "Двуреченская" батарей статических конденсаторов (БСК) и УШР пропускная способность ЛЭП-110 выросла на 30–50%, уровни напряжения достигли 105–110% номинального. Возможность оптимизации потоков реактивной мощности позволила довести передаваемую мощность до предельно допустимой по сечению проводов, обеспечить на 100% взаимное резервирование нагрузок примыкающих электропередач, на 35% снизить потери активной мощности в проводах ЛЭП-110, в десятки раз сократить число коммутаций БСК и РПН трансформаторов, обеспечить плавную автоматическую стабилизацию заданных уровней напряжения в установившихся режимах. В результате ввода реакторов РТУ-25000/110-У1 и БСК обеспечено надёжное бесперебойное электроснабжение потребителей Васюганского региона ОАО "Томскнефть".

Основное назначение реактора РТУ-100000/220-У1, эксплуатируемого на подстанции "Чита" МЭС Сибири – регулирование реактивной мощности и стабилизация напряжения.

Стоимость реактора РТУ-100000/220 оказалась существенно меньше (на 30%), чем стоимость автотрансформатора с неуправляемым реактором, что и предопределило решение о его установке на подстанции "Чита". Кроме стоимостных показателей дополнительным весьма важным преимуществом при

использовании реактора РТУ-100000/220 с автоматическим плавным регулированием мощности вместо автотрансформатора с неуправляемым реактором и многократно коммутируемым выключателем является почти трёхкратное сокращение потерь.

Установка управляемого реактора РТУ-180000/330 на подстанции "Барановичи" в Белорусской энергосистеме в связи с рядом его преимуществ оказалась существенно более целесообразной, чем применение альтернативных вариантов компенсации реактивной мощности (устройств компенсации реактивной мощности с мощными тиристорными преобразователями, синхронных компенсаторов, асинхронизированных синхронных генераторов, шунтирующих реакторов фирм ABB, "Alstom" и "Siemens" со ступенчатым регулированием мощности). Приобретённый опыт эксплуатации УШР РТУ-100000/220-У1 на подстанции "Чита" и РТУ-180000/330 на подстанции "Барановичи" противоречит распространённому мнению ряда специалистов-энергетиков о том, что управляемые реакторы нерационально располагать вблизи электрических станций, которые могут регулировать напряжение изменением возбуждения генераторов. Оказалось, что УШР весьма эффективны и в этом случае, так как они позволяют заметно облегчить работу генераторов (часто имеющих запредельный срок эксплуатации), благоприятно влияя на режим выработки и потребления реактивной мощности.

Расчёты и результаты испытаний подтверждают эффективность эксплуатации новых УШР типа РТУ-63000/110 на подстанции "Советск" МЭС Северо-Запада (рис.3), РТУ-100000/220 на подстанции "Хабаровская" МЭС Востока (рис.4) и РТУ-180000/500 на подстанции "Таврическая" МЭС Сибири.

Среди некоторых специалистов иногда обнаруживается ошибочное предубеждение в том, что УР имеют органические недостатки – несинусоидальность потребляемого тока и малое быстродействие. В действительности это далеко не так. Анализ результатов проведённых испытаний реакторов типа РТУ в сетях показал, что ток искажения реактора при номинальной мощности очень мал, в промежуточных режимах не превышает 3,5%, а при подключении к реактору кон-

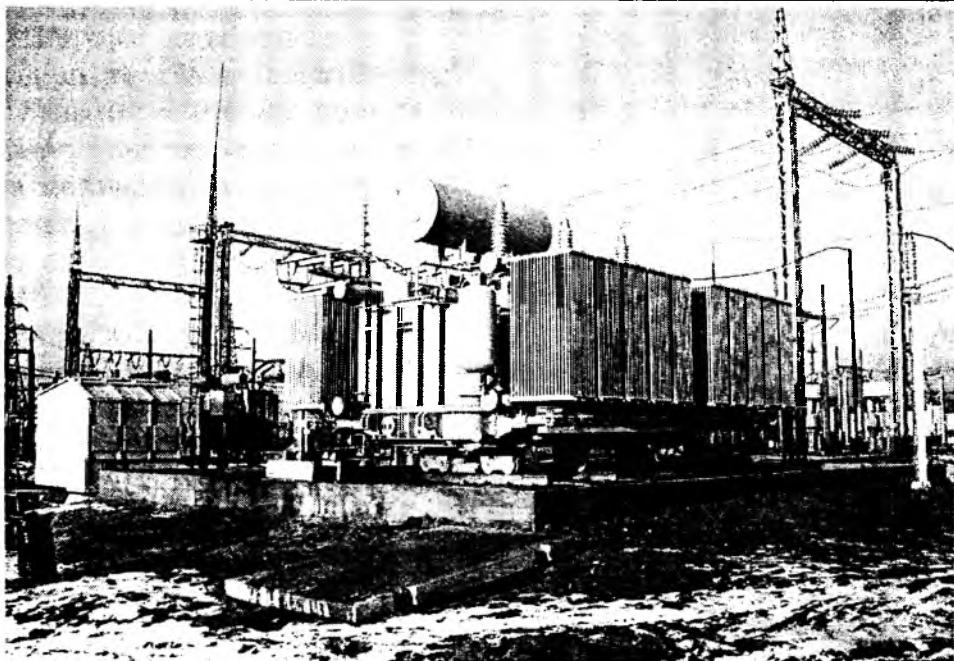


Рис.3. Реактор РТУ-63000/110 на подстанции "Советск" МЭС Северо-Запада

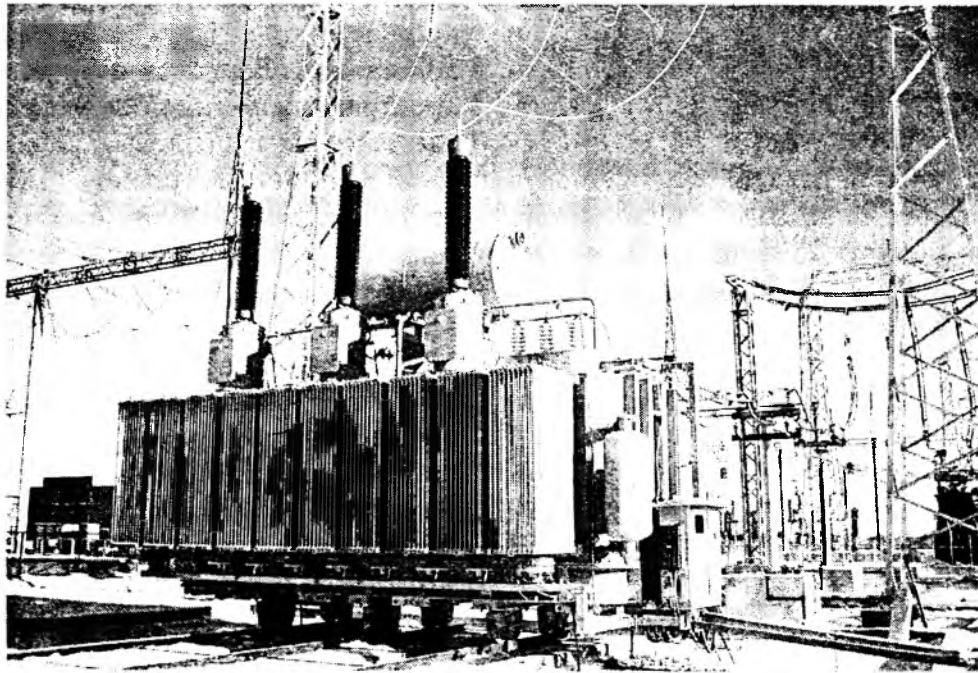


Рис.4. Реактор РТУ-100000/220 на подстанции "Хабаровская" МЭС Востока

денсаторной батареи фильтра существенно (примерно вдвое) снижается. Важно подчеркнуть, что для эксплуатации имеет значение процентное искажение напряжения сети в точке подсоединения реактора, а вовсе не значение тока искажения реактора (а часто эти совершенно различные величины ошибочно отождествляются). Проценты искажения напряжения определяются далеко не

УШР, в существенно большей степени они зависят от характера потребителей сети, от соотношения сопротивлений реактора и сети. Измерения в сети всех УШР показали, что дополнительное искажение напряжения сети при включении реактора в процентах не только много ниже процентов искажения тока реактора, но и вообще ниже уровня чувствительности регистрирующей аппаратуры

[1]. Таким образом, опыт эксплуатации показал, что нелинейные искажения УШР достаточно малы.

Устройства плавного регулирования реактивной мощности всех типов (статические компенсаторы СТК, тиристорно-реакторные группы ТРГ, управляемые шунтирующие реакторы трансформаторного типа УШРТ) используют тиристорные преобразователи, мощность которых равна полной мощности установки, а их перегрузка недопустима. В реакторах, управляемых подмагничиванием, типа РТУ мощность преобразователя мала (порядка 1%). Теоретические расчёты и уже накопленный опыт эксплуатации показал, что реакторы типа РТУ, аналогично обычному трансформаторному оборудованию, способны кратковременно подвергаться значительным перегрузкам (по напряжению, по току, по мощности). Это возникает в нормированных режимах перегрузки до 110–130% номинальной мощности и в режиме кратковременного увеличения мощности до 200%. Перегрузки по току и мощности возникают в эксплуатации реакторов также при набросах напряжения, что связано с тем, что в переходных режимах УШР является практически линейным реактором с предшествующим набросу напряжения индуктивностью и увеличение его тока пропорционально росту напряжения. Такое качество УШР очень важно для эксплуатации. Характерно, что альтернативное электротехническое оборудование регулирования реактивной мощности (СТК, ТРГ, УШРТ, СТАТКОМ – новые перспективные устройства с использованием закрывающихся тиристоров, научная разработка которых в РФ только начинается) требует либо защиты от перегрузок и набросов напряжения (т.е. немедленного отключения), либо существенного (порядка удвоения) увеличения его основных номинальных параметров (т.е. существенного увеличения стоимости). И то, и другое для эксплуатации крайне нежелательно.

При сравнении между собой различных устройств плавного регулирования индуктивности имеет смысл обратить внимание ещё на одно важное обстоятельство. Как уже упоминалось, все устройства регулируемой реактивной мощности имеют много общего. В частности, все они в известной мере исполь-

зуют вентильный эффект, т.е. электронные или магнитные вентили. Поэтому многие технические вопросы в них решаются сходным образом.

Однако, естественно, имеются отличия, большинство из которых оказывается благоприятными для УШР. Например, в СТК, ТРГ и СТАТКОМ высоковольтных обмоток нет (преобразователь на полную мощность существенно выгоднее и проще делать на низком напряжении, а не на напряжении сети 110–500 кВ), т.е. требуются дополнительные повышающие трансформаторы. Наличие УШР высоковольтных обмоток, непосредственно подключаемых к сети, а не через трансформатор, весьма благоприятно. Оно приводит к облегчению решения многих вопросов обеспечения режимов в сети. Например, регулирование мощности непосредственно на шинах высокого напряжения более эффективно, чем через повышающий трансформатор.

Определяющими применение тех или иных типов регулируемых устройств реактивной мощности оказываются многие дополнительные обстоятельства. К ним относятся мощность и стоимость преобразователей, наличие в них существенных потерь, необходимость применения водяного охлаждения, более квалифицированного обслуживающего персонала на подстанции. При этом УШР типа РТУ имеют несомненные преимущества перед другими альтернативными устройствами, так как они по существу являются более простым трансформаторным оборудованием с пониженными стоимостью и потерями, традиционными системой охлаждения и требованиями к квалификации обслуживающего персонала на подстанции. К тому же благоприятным обстоятельством, существенным образом отличающим УШР от альтернативных вариантов, является успешный опыт производства УШР на заводах России и Украины и, что наиболее важно, уже накопленный опыт эксплуатации УШР во многих регионах (в том числе шунтирующий УШР мощностью 25 МВ·А на подстанции 110 кВ "Кудымкар" – 6 лет, УШР мощностью 1,5 МВ·А, включённый параллельно конденсаторной батарее, на металлургическом заводе в г. Электросталь – 8 лет, более 100 дугогасящих УР – до 15 лет).

Следует подчеркнуть преимущества УШР по значению потерь.

Ранее уже упоминалось, что по потерям нерегулируемые (неуправляемые) реакторы не имеют преимуществ перед УШР, если учитывать конкретные коэффициенты суточной их нагрузки. Потери регулируемых устройств можно сравнивать по потерям при номинальном режиме. В УШР эти потери составляют 0,5–0,7% номинальной мощности (меньшие значения – для УШР большей мощности). В УШР эти потери больше примерно в 1,5–2 раза из-за больших потерь в самом трансформаторе с реактантом КЗ 100% и из-за потерь в преобразователе порядка 0,2–0,3%. Для СТК и ТРГ потери больше потерь в УШР также примерно в 2 раза, так как эти потери возникают и в преобразователе, и в подсоединеных к нему неуправляемых реакторах, и в повышающем трансформаторе, постоянно подключённом к сети. В СТАТКОМ потери больше, чем в УШР примерно в 3 раза также из-за потерь в повышающем трансформаторе и другом оборудовании, но прежде всего из-за существенных потерь в самих полупроводниковых приборах – полностью управляемых тиристорах (около 2%). Следует повторно отметить, что эксплуатационные потери (реальные среднесуточные) в регулируемых устройствах (в том числе и в УШР) существенно меньше, чем нормированные потери номинального режима, причём эксплуатационные потери УШР находятся на уровне потерь неуправляемых шунтирующих реакторов соответствующей номинальной мощности. Представляется разумным в дальнейшем для регулируемых устройств компенсации реактивной мощности (в том числе и в УШР) кроме потерь в режиме номинальной мощности ввести нормирование эксплуатационных потерь (реальных среднесуточных потерь при определённом коэффициенте суточной загрузки порядка 0,7).

Вопрос быстродействия УШР представляет предмет пристального внимания для специалистов, так как часто ошибочно считается, что эти реакторы очень инерционны. В результате испытаний получено, что без форсировки при мощности преобразователя всего около 0,15–0,2% номинальной мощности реактора (это – мощность, необходимая для поддержания номинального тока сетевой обмотки) время набора мощности от 0 до номинальной составляет 3–5 с. При использовании полной мощности преобразователя (для обеспечения режимов с форсировкой подмагничивания), которая составляет около 1% мощности реактора, время набора или сброса мощности по осцилограмме переходного процесса составляет 0,3 с.

Полученные при испытаниях в сети реакторов РТУ параметры быстродействия вполне соответствуют теоретическим расчётам [1]. Теория и практика показали, что быстродействие УШР может быть существенно увеличено (когда это диктуется обоснованными требованиями эксплуатации, а это требуется далеко не всегда) при увеличении мощности преобразователя, питающего обмотки подмагничивания. Фактически УШР становится безынерционным при мощности преобразователя, равной примерно 25% мощности реактора. Увеличенная мощность источника подмагничивания должна использоваться не постоянно, как в альтернативных устройствах, а кратковременно (десяти доли секунды), только в переходных режимах форсировки. Для удовлетворения реальных требований эксплуатации оказывается вполне достаточной мощность преобразователя на уровне 1% мощности реактора.

Быстродействие реактора помимо прочего можно характеризовать временем набора мощности при включении УШР в сеть. Этот параметр важен, например, для работы реактора в режимах опробования или автоматического повторного включения ВЛ класса 500 кВ. УШР практически безынерционно (за время менее полпериода промышленной частоты) выходит на полную мощность, так как в схеме реактора предусмотрено создание в стержнях магнитопровода реактора некоторой начальной индукции (порядка остаточной индукции в стали) предварительным подмагничиванием мощностью около 100 кВт с независимым от напряжения на реакторе питанием.

Опыт эксплуатации УШР показал, что полученных параметров быстродействия вполне достаточно для их нормальной эксплуатации.

Особенно большое значение для разработчиков управляемых подмагничиванием реакторов имеет тот факт, что экспериментальные данные, полученные при сетевых испытаниях, совпали с многочисленными расчётами на стадии проектирования реактора и составления программы его испытаний, с

результатами теоретических исследований, предшествовавших разработке реактора. Это вселяет уверенность в успех новых управляемых подмагничиванием реакторов, в их более ускоренное и широкое применение.

Ещё в самом начале работы, более десятилетия тому назад, один из ведущих специалистов в области энергетики сказал, что в электрических сетях, к сожалению, почти отсутствуют возможности хоть какого-либо регулирования. Плавное регулирование (генераторами, синхронными компенсаторами) сильно ограничено и для протяжённых сетей не всегда эффективно, ступенчатое регулирование напряжения сетей устройствами РПН трансформаторов из-за ненадёжности этих устройств сильно ограничено или вообще запрещено, число коммутаций высоковольтных выключателей также сильно ограничено. Электротехническая наука в течение многих десятилетий предлагает различные устройства регулирования реактивной мощности (СТК, ТРГ, УШРТ, СТАТКОМ), однако до их широкого внедрения ещё очень да-леко. Практически всё остаётся по старому, и единственными средствами воздействия являются деление электрических сетей, отключение потребителей и т.д. Поэтому появление в сетях УШР, основная задача которых регулирование их реактивной мощности, отрадный факт, требующий, по оценке научных и проектных организаций, широкого распространения в электрических сетях всех классов напряжения.

В заключение необходимо отметить, что технические характеристики и экономические показатели реакторов РТУ не имеют аналогов в мировом электромашиностроении. По конструкции, условиям и простоте эксплуатации управляемые реакторы сопоставимы с обычным трансформаторным и реакторным оборудованием, а по функциональным возможностям являются автоматически регулируемыми электротехническими комплексами, на новом уровне решаями многие вопросы управления и оптимизации режимов работы электрических сетей. Потери в реакторах в постоянном номинальном режиме и расход материалов на изготовление реакторов не превышают 1,5–2-кратного значений этих же показателей для обычных неуправляемых шунтирующих реакторов. Стоимость УШР почти в 2 раза ниже альтернативных вариантов (статических тиристорных компенсаторов, реакторов трансформаторного типа), они не требуют отапливаемого помещения и установки охлаждения дейонизованной воды.

Результаты внедрения управляемых шунтирующих реакторов (УШР) в сетях 110–500 кВ показали, что в настоящее УШР выполняют все необходимые запросы эксплуатации и созданы все условия для широкого внедрения этих реакторов.

#### Список литературы

1. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы / Под ред. А.М. Брянцева. М.: Знак, 2004.

## ИССЛЕДОВАНИЯ

# Моделирование и анализ системы с многофазным асинхронным генератором и многотактным активным выпрямителем

ПРОНИН М. В.

Моделирование системы с асинхронным генератором и активным выпрямителем выполнено при разделении её на подсистемы, взаимосвязанные зависимыми источниками напряжения и тока. Показано, что в мощных системах перспективно применение многофазных генераторов и многотактных выпрямителей. Однако при проектировании необходимо учитывать, что для ряда гармонических составляющих токов выпрямителя обмотки генератора могут обладать сравнительно малыми индуктивностями.

*Modeling system with induction generator and multi-stage active rectifier has been implemented under separating this system on subsystems which are interconnected by dependent voltages and currents sources. It is shown that in power systems perceptively use of the multi-phase generators and multi-stage rectifiers. However under designing these systems consideration must be given to generator windings can have comparatively little inductances for series of harmonic components.*

При предъявлении к конструкции генераторов переменного тока каких-либо особых требований в ряде случаев предпочтительнее применение асинхронных машин. Ротор асинхронной машины не содержит некоторые элементы, имеющиеся в машинах синхронных, – обмотку возбуждения, контактные кольца или вращающийся выпрямитель и др., он выдерживает более высокие механические нагрузки и может быть выполнен на более высокую частоту вращения. Если решается задача создания автономной установки, в которой электроснабжение потребителей может производиться по сети постоянного напряжения, то возможно построение системы с высокооборотным асинхронным генератором и активным выпрямителем на модулях IGBT. В высокооборотных электрических машинах потери энергии концентрируются в меньшей массе активных материалов и существует проблема их снижения. Одно из мероприятий по снижению потерь заключается в размещении на статоре нескольких трёхфазных обмоток, взаимно сдвинутых по фазе. К другим мероприятиям относится применение многотактных [1] и многоуровневых [2] активных выпрямителей. Многотактные выпрямители позволяют также уменьшить ёмкость конденсаторных батарей в звене постоянного напряжения. Вместе с тем, полупроводниковые преобразователи в режиме ШИМ генерируют широкий спектр гармонических составляющих токов и напряжений. Для некоторых составляющих индуктивности многофазных машин могут оказаться малыми. Это подтверждено экспериментально для шестифазных двигателей, питающихся от транзисторных инверторов [2]. Применительно к системам генерирования электроэнергии указанные особенности необходимо исследовать.

В соответствии с поставленной задачей рассматривается система, в которой к многофазному асинхронному генератору подключён многотактный активный выпрямитель, питающий нагрузку. Структурная схема системы представлена на рис.1.

В схеме:  $n = 1, 2, 3$  – номер фазы генератора;  $j = 1, 2, \dots, J_v$  – номер подфазы выпрямителя;  $m = 1, 2, \dots, M$  – номер трёхфазной обмотки генератора;  $AG$  – асинхронный генератор;  $I_{ym}$  – уравнительные дроссели;  $k_{njm}$  – транзисторные модули выпрямителя;  $c$  и  $r_c$  –

ёмкость и активное сопротивление конденсаторной батареи;  $e_a$  и  $r_a$  – ЭДС и активное сопротивление аккумуляторной батареи;  $k_a$  – диод;  $r_d$ ,  $I_d$  – активное сопротивление и индуктивность нагрузки.

Математическое моделирование системы (рис.1) выполнено при разделении её на подсистемы (подсхемы) рис.2, взаимосвязанные зависимыми элементами (обозначения элементов и последовательность преобразований системы пояснены ниже при её математическом описании).

В модели асинхронной машины [2, 3] принято, что трёхфазные обмотки взаимно сдвинуты по фазе на угол  $\pi / 3M$ , нулевые точки обмоток выведены, ротор короткозамкнутый. Статорные обмотки описаны в фазных осях при следующих обозначениях:  $u_{nm}$  – напряжения фаз,  $i_{nm}$  – токи фаз. В подсхемах статорных обмоток в качестве зависимых источников учтены фазные ЭДС  $e_{nm}$  (обусловленные магнитным потоком в зазоре), а также ЭДС взаимной индукции фаз по путям рассеяния  $e_{snm}$ . Учтены индуктивности фаз  $l$  и активные сопротивления  $r_1$ . ЭДС  $e_{snm}$  и индуктивность  $l$  определяются при использовании индуктивности рассеяния фаз в симметричном режиме работы всех обмоток  $I_{sM}$ , индуктивности рассеяния фаз в симметричном режиме работы одной трёхфазной обмотки

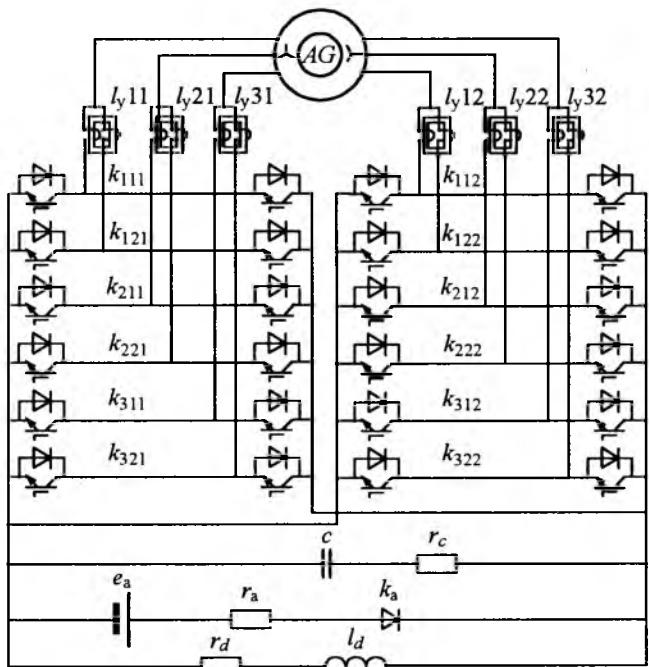


Рис.1. Система с асинхронным генератором, выпрямителем и нагрузкой

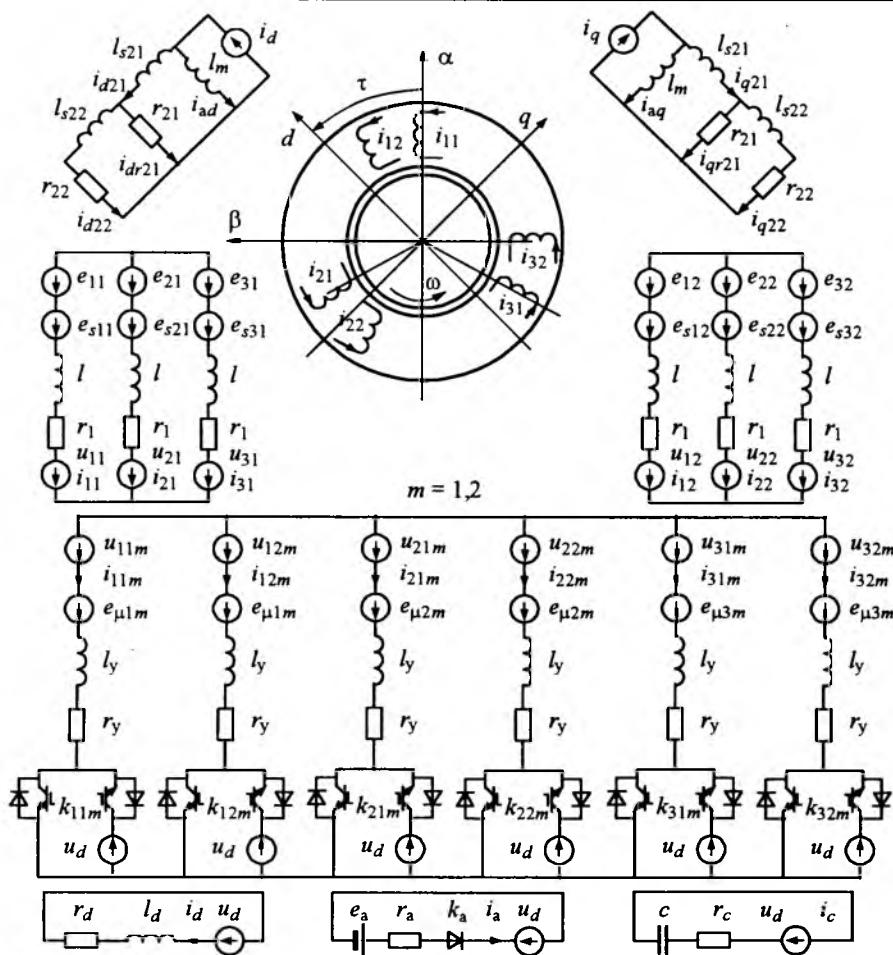


Рис.2. Разделение системы с асинхронным генератором и активным выпрямителем на подсистемы

$l_{s1}$ , индуктивности нулевой последовательности  $l_0$ . Контуры ротора представлены в виде цепных схем для учёта вытеснения токов. В подсхемах роторных контуров по осям  $d$  и  $q$  (неподвижных относительно ротора) в качестве зависимых источников учтены токи реакции якоря  $i_d$  и  $i_q$ , индуктивность намагничивания  $l_m$ , индуктивности рассеяния  $l_{s21}$ ,  $l_{s22}$  и активные сопротивления  $r_{21}$ ,  $r_{22}$ . На рис.2 указаны направления токов и источников напряжения, направления неподвижных осей  $\alpha$  и  $\beta$ , врачающихся осей  $d$  и  $q$ , направление вращения ротора с частотой  $\omega$ , угол поворота  $\tau$  оси  $d$  ротора относительно оси  $\alpha$ . Подсхемы рис.2 соответствуют разделению асинхронной машины на части по магнитным потокам взаимной индукции обмоток. Индуктивные связи подсхем учитывается зависимыми источниками напряжения  $e_{nm}$ ,  $e_{snm}$  и тока  $i_d$  и  $i_q$ . Ниже представлена математическая модель асинхронной машины.

В модели машины используются индуктивности:

$$\left. \begin{aligned} l &= 2l_{s1} - l_{sM}; \\ l_a &= M(l_{sM} - l_{s1}); \\ l_b &= (l_0 - l)/3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В модели машины используются коэффициенты:

$$\left. \begin{aligned} c_{nm} &= \cos \left[ \frac{2\pi}{3} \left( n-1 + \frac{m-1}{2M} \right) \right]; \\ s_{nm} &= \sin \left[ \frac{2\pi}{3} \left( n-1 + \frac{m-1}{2M} \right) \right]; \\ c_m &= \cos \left[ \frac{\pi}{M} (m-1) \right]; \\ s_m &= \sin \left[ \frac{\pi}{M} (m-1) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Производные токов по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_\alpha}{dt} &= \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 c_{nm} \frac{di_{nm}}{dt}; \\ \frac{di_{\alpha 0}}{dt} &= \sum_{m=1}^M c_m \sum_{n=1}^3 \frac{di_{nm}}{dt}; \\ \frac{di_\beta}{dt} &= \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 s_{nm} \frac{di_{nm}}{dt}; \\ \frac{di_{\beta 0}}{dt} &= \sum_{m=1}^M s_m \sum_{n=1}^3 \frac{di_{nm}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ЭДС взаимной индукции фаз статорных обмоток по путям рассеяния

$$\left. \begin{aligned} e_{snm} &= -l_a \left( c_{nm} \frac{di_\alpha}{dt} + s_{nm} \frac{di_\beta}{dt} \right) - \\ &- l_b \left( c_m \frac{di_{\alpha 0}}{dt} + s_m \frac{di_{\beta 0}}{dt} \right). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Токи реакции якоря по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 c_{nm} i_{nm}; \\ i_\beta &= \frac{2}{3M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^3 s_{nm} i_{nm}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Токи реакции якоря по осям  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} i_d &= i_\alpha \cos \tau + i_\beta \sin \tau; \\ i_q &= i_\alpha \sin \tau - i_\beta \cos \tau. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Производные токов реакции якоря по осям  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{di_\alpha}{dt} \cos \tau + \frac{di_\beta}{dt} \sin \tau - \omega i_q; \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{di_\alpha}{dt} \sin \tau - \frac{di_\beta}{dt} \cos \tau + \omega i_d. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Токи контуров ротора по оси  $d$  и их производные:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{ad}}{dt} &= \frac{l_{s21} \frac{di_d}{dt} + r_{21} i_{dr21}}{l_m + l_{s21}}, \frac{di_{d22}}{dt} = \frac{r_{21} i_{dr21} - r_{22} i_{dr22}}{l_{s22}}, \\ i_{d21} &= i_d - i_{ad}; \quad i_{dr21} = i_{d21} - i_{d22}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Токи контуров ротора по оси  $q$  и их производные:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{aq}}{dt} &= \frac{l_{s21} \frac{di_q}{dt} + r_{21} i_{qr21}}{l_m + l_{s21}}, \frac{di_{q22}}{dt} = \frac{r_{21} i_{qr21} - r_{22} i_{qr22}}{l_{s22}}, \\ i_{q21} &= i_q - i_{aq}; \quad i_{qr21} = i_{q21} - i_{q22}. \end{aligned} \right\}$$

Проекции ЭДС на оси  $d$  и  $q$ :

$$\left. \begin{aligned} e_d &= -l_m \left( i_{aq} \omega + \frac{di_{ad}}{dt} \right); \\ e_q &= l_m \left( i_{ad} \omega - \frac{di_{aq}}{dt} \right). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ЭДС по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} e_\alpha &= e_d \cos \tau + e_q \sin \tau; \\ e_\beta &= e_d \sin \tau - e_q \cos \tau. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ЭДС фаз обмоток статора, обусловленные основным магнитным потоком,

$$e_{nm} = e_\alpha c_{nm} + e_\beta s_{nm}. \quad (12)$$

Электромагнитный момент машины

$$M_{em} = 1,5 M l_m (i_{ad} i_q - i_{aq} i_d). \quad (13)$$

Частота вращения машины  $\omega$  при моменте инерции  $J$  определяется моментом первичного двигателя  $M_T$  и электромагнитным моментом:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_T - M_{em}). \quad (14)$$

Угол поворота ротора  $\tau$  определяется из следующего уравнения:

$$\frac{d\tau}{dt} = \omega. \quad (15)$$

Уравнения (14) и (15) относятся к подсистеме движения ротора асинхронной машины, которая связана с электрическими подсистемами переменными  $M_{em}$ ,  $\omega$ ,  $\tau$ . Связь подсхем генератора с подсхемами выпрямителя и нагрузки устанавливается при использовании зависимых источников напряжения фаз генератора  $u_{nm}$  и подфаз выпрямителя  $u_{njm}$ :

$$\left. \begin{aligned} u_{njm} &= u_{nm} + l_{st} \frac{di_{njm}}{dt} = e_{nm} + e_{snm} - l \frac{di_{nm}}{dt} - \\ &- r_1 i_{nm} + l_{st} \frac{di_{njm}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

В (16) напряжения подфаз увеличены относительно  $u_{nm}$  на значения падения напря-

жения на стабилизирующих индуктивностях  $I_{st}$ , которые введены в подфазы для обеспечения устойчивости итерационных вычислений. Дополнительные индуктивности и ЭДС не влияют на результаты вычислений, так как взаимно компенсируются.

В дросселях учитываются активные сопротивления  $r_y$ , индуктивности рассеяния  $I_{ys}$  и взаимные индуктивности  $I_{yu}$  подфаз. Индуктивные связи подфаз учитываются зависимыми источниками напряжения:

$$e_{\mu nm} = \frac{l}{J_v - l} I_{yu} \sum_{j=1}^{J_v} \frac{di_{njm}}{dt}. \quad (17)$$

В подсхемах (рис.2) в дросселях используются суммарные индуктивности подфаз:

$$I_y = I_{ys} + I_{yu} J_v / (J_v - 1) + I_{st}, \quad J_v > 1. \quad (18)$$

Другое преобразование системы (рис.1) при разделении её на подсистемы (рис.2) основано на замене конденсатора зависимым источником напряжения

$$u_d = \frac{1}{c} \int i_c dt + r_c i_c. \quad (19)$$

Далее источник  $u_d$  переносится в ветви нагрузки, аккумуляторной батареи и в плечи транзисторных мостов. При этом образуются более простые подсистемы (рис.2).

В подсистеме нагрузки ток  $i_d$  определяется по формуле:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{l}{l_d} (u_d - r_d i_d). \quad (20)$$

Ток в подсистеме аккумуляторной батареи:

$$i_a = k_a (e_a - u_d) / r_a. \quad (21)$$

Если  $e_a > u_d$ , то  $k_a = 1$  (диод открыт). Если  $i_a < 0$ , то  $k_a = 0$  (диод закрыт).

В транзисторных мостах каждая функция  $k_{njm}$  описывает состояние всех вентилей, подключённых к одной подфазе дросселя  $k_{njm} = 1$ , если открыто плечо моста, подключённое к положительному полюсу конденсатора,  $k_{njm} = 0$ , если открыто другое плечо. В зависимости от состояния этих функций определяются источники напряжения

$$u_{dnjm} = k_{njm} u_d. \quad (22)$$

При последующих преобразованиях транзисторных подсхем из напряжений подфаз удаляются составляющие нулевой последовательности  $u_{0m}$  и определяются эквивалентные источники напряжений подфаз  $u_{enjm}$ :

$$\left. \begin{aligned} u_{0m} &= \frac{1}{3J_v} \sum_{n=1}^3 \sum_{j=1}^{J_v} u_{dnjm}; \\ u_{enjm} &= u_{dnjm} - u_{0m}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Токи подфаз  $i_{njm}$  определяются из выражений:

$$\frac{di_{njm}}{dt} = \frac{1}{l_y} (u_{njm} + e_{\mu nm} - u_{enjm} - r_y i_{njm}). \quad (24)$$

Токи фаз генератора и их производные:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{nm}}{dt} &= \sum_{j=1}^{J_v} \frac{di_{njm}}{dt}; \\ i_{nm} &= \sum_{j=1}^{J_v} i_{njm}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Через зависимые источники тока  $i_{nm}$  и напряжения  $u_{nm}$  устанавливается связь подсхем трёхфазных обмоток генератора и подсхем выпрямителя.

Выпрямленный ток преобразователя

$$i_v = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{J_v} \sum_{n=1}^3 i_{njm} k_{njm}. \quad (26)$$

Ток конденсатора:

$$i_c = i_v + i_a - i_d. \quad (27)$$

Через зависимые источники тока  $i_v$ ,  $i_a$ ,  $i_d$ ,  $i_c$  и напряжения  $u_d$  устанавливается связь подсхем выпрямителя, аккумуляторной батареи, нагрузки и конденсатора.

При численном решении системы уравнений (1)–(27) в итерационном цикле расчёта (в цикле решения алгебраических уравнений) определяются напряжения и производные токов зависимых источников, через которые подсистемы (рис.2) связаны друг с другом. После выполнения заданного числа итераций в цикле расчёта по времени осуществляется интегрирование дифференциальных уравнений. Далее цикл расчёта повторяется.

В одном из вариантов управления генератором и выпрямителем напряжение нагрузки  $u_d$  поддерживается на заданном уровне пропорционально-интегральным регулятором, воздействующим на частоту многофазной системы напряжений управления  $u_{ym}$  ( $n = 1, 2, 3, m = 1, 2, \dots, M$ ). Напряжение генератора определяется заданной амплитудой напряжений управления (глубиной модуляции выпрямителя в режиме ШИМ). Для каждого выпрямительного моста формируется пилообразное опорное на-

пряжение  $u_{opjm}$ . Опорные напряжения различных мостов взаимно сдвинуты по фазе на угол  $2\pi / (J_v M)$  для снижения пульсаций напряжений и токов на входе и выходе выпрямителя. Импульсы управления (функции состояния) транзисторов  $k_{njm}$  определяются условиями:

$$\begin{cases} \text{если } u_{ynm} > u_{opjm}, \text{ то } k_{njm} = 1, \\ \text{иначе } k_{njm} = 0. \end{cases} \quad (28)$$

Расчёты выполнены на ЭВМ в относительных единицах для системы с шестифазным генератором и шеститактным выпрямителем. В качестве базисных единиц всей системы приняты базисные единицы генератора. Параметры генератора:  $P = 1$  о.е., фазное напряжение  $U = 1$  о.е.,  $f = 200$  Гц,  $\cos\phi = 0,88$ ,  $s_h = 0,21\%$ ,  $I_{sM} = 0,085$  о.е.,  $r_1 = 0,004$  о.е.,  $I_m = 2,86$  о.е.,  $I_{s21} = 0,028$  о.е.,  $r_{21} = 0,0022$  о.е. В выпрямителе:  $I_{ys} = 0,08$  о.е.,  $I_{yu} = 1$  о.е.,  $c = 1000$  мкФ,  $u_d = 2,75$  о.е., мощность нагрузки 1 о.е., частота ШИМ 1,5 кГц. Результаты расчёта представлены на рис. 3, где изображены напряжение и ток фазы генератора при  $I_{s1} = I_{sM} = 0,085$  о.е. и при  $I_{s1} = 0,045$  о.е.

Как видно из рис. 3, уровень пульсаций фазного тока генератора на частотах ШИМ зависит от соотношения индуктивностей рассеяния обмоток статора для трёхфазного ( $I_{s1}$ ) и многофазного ( $I_{sM}$ ) режимов работы. Пульсации токов увеличиваются при уменьшении соотношения  $I_{s1} / I_{sM}$  (при уменьшении шага обмоток статора). В этих случаях для ряда гармонических составляющих токов выпрямителя индуктивности асинхронной машины оказываются сравнительно малыми.

На рис. 4 представлена расчётная зависимость действующего тока  $I_c$  конденсатора от

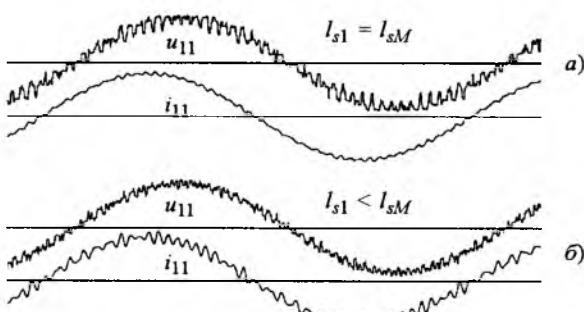


Рис.3. Напряжение и ток фазы генератора:  
а – при  $I_{s1} = I_{sM}$ ; б – при  $I_{s1} < I_{sM}$

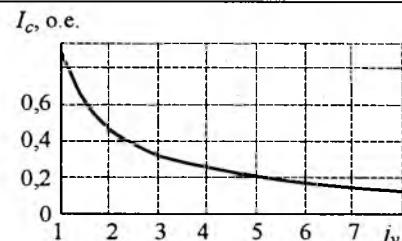


Рис.4. Зависимость тока конденсатора от числа параллельно включённых мостов выпрямителя

количества параллельно включенных транзисторных мостов выпрямителя  $J_v$  в системе с шестифазным генератором при номинальной нагрузке.

#### Выводы

1. В системе с многофазным генератором и активным выпрямителем возможны повышенные пульсации токов фаз на частотах ШИМ. Увеличение пульсаций токов обусловлено наличием индуктивных связей обмоток генератора по путям рассеяния. Разработана математическая модель системы с асинхронным генератором и многотактным выпрямителем, в которой эти явления учтены.

2. Увеличение количества параллельно включённых мостов активного выпрямителя даёт возможность снизить токовую нагрузку конденсаторов в звене выпрямленного напряжения. Это позволяет рекомендовать многотактные преобразователи для использования в мощных системах.

#### Список литературы

- Иванов А.В., Климов В.И., Крутяков Е.А., Левин В.Н. Особенности работы инвертора с широтно-импульсной модуляцией // Электричество. 1979. № 8.
- Пронин М.В., Воронцов А.Г., Калачиков П.Н., Емельянов А.П. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями. СПб.: "Силовые машины" "Электросила". 2004.
- Пронин М. В. Математические модели синхронных и асинхронных машин с произвольным числом трехфазных обмоток для анализа систем с полупроводниковыми преобразователями // Электросила. 2003. № 42.

**Пронин Михаил Васильевич** – начальник бюро электроприводов переменного тока ОАО "Силовые машины" (филиал "Электросила"), канд. техн. наук. Окончил факультет корабельной электрорадиотехники и автоматики ЛЭТИ им. В.И. Ульянова в 1969 г. Зашел диссертацию по теме "Разработка и применение математических моделей синхронных машин и полупроводниковых преобразователей для исследования гребных электрических установок ледоколов" во ВНИИЭлектромаш в 1988 г.

# **НИЗКОВОЛЬТНЫЕ АППАРАТЫ**

## **Мониторинг заказов электрических низковольтных аппаратов**

**ЗЕКЦЕР Д.М.**

Существующая нормативная и техническая информация о функциональном назначении, параметрах и характеристиках низковольтных электрических аппаратов, к сожалению, содержит некоторые ошибки и не учитывает текущие замены устаревших аппаратов на новые изделия, имеющие меньшие массогабаритные параметры и более надёжные характеристики.

Это влияет на сроки выполнения заказов, монтажа аппаратов и устройств электрических сетей и электропривода, а также на качество и надёжность эксплуатации аппаратуры распределения, управления и защиты электропитания объектов промышленности, сельского хозяйства и транспорта.

В [1–3] приведены таблицы замены низковольтных электротехнических аппаратов.

Ниже приводятся некоторые ошибки нормативно-технических документов и дополнительные таблицы замены НВА на более современные аппараты.

В ОСТ на контакторы предусматривается выпуск КТ-7025 на 5 полюсов, однако заводы такой контактор не изготавливают. В ТУ на контакторы КТ6600 приведены контакторы с медными и серебряными контактами, но заводы выпускают эту серию только с серебряными контактами.

В информации указано, что сельсиновые командоаппараты СКАР, СКАЗ и СКАП заменены на КСР, КСП и КПП, что не соответствует действительности. Такое же положение с заменой контакторов КТ6000 на КМ-15.

Пускатели серии ПМЛ не изготавляются с управлением постоянным током, как об этом сообщается в каталоге. Можно использовать ПМЛ с втягивающей катушкой на постоянном токе, но для этого нужно переходить на форсированный режим с использованием одного вспомогательного контакта с замедлением, а напряжение катушки переменного тока взять на один порядок больше. При этом коэффициент форсировки для схемы с добавочным резисто-

ром определяется формулой  $K_F = 1 + R_d / R_o$ , где  $R_d$ ,  $R_o$  – соответственно сопротивления добавочного резистора и обмотки.

В заводской информации на реле времени ВС-43-3 и ВС-43-6 приведены все контакты с выдержкой времени. Однако реле ВС-43-6 должно иметь шесть контактов с выдержкой времени и один контакт – без выдержки времени.

В технической документации на реле КДР даются рекомендации для кратковременного режима работы и совершенно не приводятся рекомендации для наиболее часто применяемого режима работы – повторно-кратковременного.

При этом рекомендуется, чтобы средняя мощность на катушку в течение рабочего импульса и паузы не превышала допустимой мощности в статическом режиме. Однако эксплуатационщики, монтажники, проектировщики, в основном, не владеют расчётами мощности реле в повторно-кратковременном режиме работы.

Если использовать данные технической документации, то пауза при двукратном номинальном напряжении должна быть 21,3 мин, а при четырёхкратном номинальном напряжении – 20 мин. Расчёты произведены с учётом допустимой мощности, подаваемой на катушки, 3,5 Вт для каркаса из пластмассы и 4 Вт для медного каркаса катушки.

Незначительная разница в длительности паузы объясняется тем, что реле работает практически в адиабатическом режиме, когда длительность импульса 5 или 1 мин.

Постоянная времени реле по нагреву

$$\tau = \frac{CMQ}{P},$$

где  $C$  – теплоёмкость, Дж/(кг·°C);  $M$  – масса, кг;  $Q$  – температура нагрева при  $P_{\text{ном}}$ , °C;  $P$  – номинальная мощность, Вт.

Для нашего случая

$$\tau = \frac{390 \cdot 0.1 \cdot 30}{3} \approx 6 \text{ мин.}$$

Применение двукратного или четырёхкратного напряжения объясняется необходимостью уменьшения времени срабатывания реле при большом контактном наборе.

Если длительность цикла намного меньше постоянного времени нагрева, что бывает практически во всех системах автоматики и телемеханики, то коэффициент перегрузки по мощности  $K_P$  может быть определён по формуле:

$$K_P = \frac{100}{\text{ПВ}},$$

где ПВ – относительная продолжительность включения, %,

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{и}} + t_{\text{п}}} \cdot 100;$$

$t_{\text{и}}$  – длительность импульса;  $t_{\text{п}}$  – длительность паузы.

Так как мощность, потребляемая обмоткой, пропорциональна квадрату напряжения, то допустимое напряжение питания в повторно-кратковременном режиме может быть рассчитано по формуле:

$$U_{\text{ппк}} = U_{\text{пр}} \sqrt{100/\text{ПВ}},$$

где  $U_{\text{пр}}$  – напряжение в продолжительном режиме.

В данном случае для повторно-кратковременного режима можно рекомендовать 7 Вт в течение 5 мин и 27 Вт в течение 1 мин.

#### Пакетные переключатели

Заменяемые	Заменяющие	Примечание
ПВП 11-29	ПВП 17-29	
ПВП 11-31	ПВП 17-31	2, 3, 5 пакетов

#### Ящики

Заменяемый	Заменяющий	Примечание
ЯРП	ЯВМ	Рубильники и предохранители

#### Предохранители

Заменяемый	Заменяющий
ПН2	ПП32

#### Выключатели

Заменяемые	Заменяющие
ВУ-150А	ВУ-150М
ВУ-250А	ВУ-250М

#### Трансформаторы

Заменяемый	Заменяющий
ТБС	ОСМ

#### Реле

Заменяемые	Заменяющие	Примечание
РС-67	УКС 1, УКС 2	УКС 1 и УКС 2
РПЛ 12204А	РЭВ 2220	С датчиком
РПЛ 13104А	ЭВ 2310	
ВЛ 34	ВЛ81	
РПЛ 14004А	РЭВ 2400	
ВЛ 47	ВЛ68	
P716-12-2	РЭВ 1122	
P716-12-3	РЭВ 1122	
P716-30-2	РЭВ 1302	
P716-30-3	РЭВ 1302	
ЭГ-523/10	РТ 40/10	
РПЛ-22204А	РЭВ 1220	
РПЛ-23104А	РЭВ 1310	
РПЛ-24004А	РЭВ 1400	
РЭ16-12-2	РЭВ 2122	
РЭ16-12-3	РЭВ 2122	
РЭ16-30-2	РЭВ 2302	
РЭ16-30-3	РЭВ 2302	

#### Электромагниты

Заменяемые	Заменяющие
EMA 240/7,5	ЭМЛ 1203
КВМ 36В	ЭМЛ 02-18
ПЭ38	ЭМЛ 04-18
PC328	ЭМ 54

#### Электромагнитные контакторы

Заменяемые	Заменяющие
КПД 111Е	МК2-10
КПД 121 Е	МК2-20
КПД 112 Е	МК3-10
КПД 113 Е	МК4-10
КПД 114 Е	МК6-10
KT 6023, KT 6033	KM20-35
KT 6043	KM20-37

#### Автоматические воздушные выключатели

Заменяемые	Заменяющие
AE2060	AE2060M1
2ВО30-2П	ВА74-45
AM8-М	ВА74-40
AM15-М	ВА74-43
AM30-М	ВА74-45
AM55-М	ВА74-48

#### Блоки контроля

Заменяемый	Заменяющий
БКУ1, БКУ2	БКС3

# **В Академии электротехнических наук РФ**

Ежегодное общее собрание Академии электротехнических наук Российской Федерации (АЭН РФ) совместно с научной сессией Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления (секция энергетики) РАН прошло 8 февраля 2006 г.

В соответствии с повесткой дня были заслушаны информация и.о. Президента АЭН РФ И.Б. Пешкова о работе Президиума АЭН РФ за 2005 г., доклад председателя ревизионной комиссии академии А.И. Яковлева о финансово-хозяйственной деятельности академии, рассмотрены предложения, содержащиеся в докладах и.о. первого вице-президента АЭН РФ, чл.-кор. РАН П.А. Бутырина о внесении частичных изменений в Устав АЭН РФ и главного учёного секретаря академии Ю.М. Инькова об организационно-правовой форме деятельности академии.

Работа Президиума АЭН РФ за 2005 г. признана удовлетворительной.

В 2005 г. были проведены Всероссийский электротехнический конгресс; ряд научно-технических конференций, в том числе с международным участием, организованных отраслевыми отделениями АЭН РФ. Важным достижением работы академии стало издание 1-го тома электротехнической энциклопедии, являющееся заслугой, прежде всего, главного редактора издания и члена Президиума АЭН РФ А.Ф. Дьякова.

Общее собрание утвердило изменения к Уставу академии и поручило бюро президиума АЭН РФ оформить эти изменения в установленном порядке. Бурно обсуждалась возможность изменения организационно-правовой формы деятельности АЭН РФ. Сохранить для академии статус общественной организации или преобразовать её в некоммерческое партнерство, как это уже сделали некоторые отраслевые академии? В результате было решено сохранить существующую форму правового статуса академии, однако поручить президиуму АЭН РФ рассмотреть возможность организации специальных центров по основным направлениям деятельности в форме некоммерческих партнёрств.

В связи с кончиной в июле 2005 г. президента АЭН РФ Б.И. Петленко, исполнение обязанностей Президента АЭН РФ возложено на И.Б. Пешкова – доктора техн. наук, проф., первого вице-президента АЭН РФ, крупнейшего специалиста в области кабельной техники, председателя Совета директоров ОАО "ВНИИКП" и президента ассоциаций "Электрокабель" и "Интеркабель". последние полгода практически выполняв-

шего обязанности президента АЭН РФ. Кроме того, исполнение обязанности первого вице-президента АЭН РФ было возложено на члена-корреспондента РАН, вице-президента АЭН РФ П.А. Бутырина. Вице-президентом АЭН РФ был избран действительный член АЭН РФ Г.П. Воронин.

Общее собрание утвердило новых академиков-секретарей научно-отраслевых отделений 1, 5, 6, 11, 12, 13 АЭН РФ, избрало новых почётных академиков, действительных членов и член-корреспондентов АЭН РФ.

**Открытым голосованием избраны почётными академиками АЭН РФ:**

Соболева Аза Сергеевна – чл.-кор. АЭН РФ, ведущий научный сотрудник ГУП "Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина";

Реморов Андрей Алексеевич – действительный член АЭН РФ, профессор МГУПС (МИИТ);

Иванченко Георгий Евтихиевич – действительный член АЭН РФ, академик-секретарь научно-отраслевого отделения, профессор МГСУ;

Мамедов Фуад Али оглы – действительный член АЭН РФ, профессор РГАЗУ;

Васильев Александр Сергеевич – действительный член АЭН РФ, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

В соответствии с опубликованными в печати вакансиями в результате тайного голосования были избраны действительными членами АЭН РФ:

– по отделению 1 "Теоретическая электротехника" Гузаиров М.Б., доктор техн. наук, проф., ректор Уфимского авиационного института;

– по отделению 2 "Электроэнергетика" Амерханов Р.А., чл.-кор. АЭН РФ, доктор техн. наук, профессор Кубанского государственного аграрного университета;

– по отделению 3 "Электромеханика и силовая преобразовательная техника в промышленности" Каржавов Б.Н., чл.-кор. АЭН РФ, доктор техн. наук, главный научный сотрудник ФГУП "ЦНИИАГ", Хватов С.В., чл.-кор. АЭН РФ, заведующий кафедрой Нижегородского ГТУ;

– по отделению 4 "Электротехнические системы и устройства общего и специального назначения" Бабокин Г.И., чл.-кор. АЭН РФ, доктор техн. наук, проф., проректор по научной работе Новомосковского института Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева; Литвин В.И., чл.-кор. АЭН РФ, доктор техн. наук, профессор кафедры Российской государственной Аграрного заочного университета;

**– по отделению 5 "Электротехнические системы транспорта и космической техники"** Бабак А.Г., чл.-кор. АЭН РФ, Председатель совета директоров НПП "Томилинский электронный завод"; Дектев Н. И., чл.-кор. АЭН РФ, советник ДГУП "КВАНТ-Н"; Сергеева М.Н., чл.-кор. АЭН РФ, ведущий научный сотрудник ФГУП "НПП ВНИИЭМ"; Шабалин Н.Г., доктор техн. наук, проф., начальник Департамента технической политики ОАО "РЖД";

**– по отделению 6 "Электротехнология"** Демидович В.Б., чл.-кор. АЭН РФ, доктор техн. наук, проф., зам. генерального директора по науке ВНИИТВЧ; Макаров А.Н., чл.-кор. АЭН РФ, доктор техн. наук, проф., зав. кафедрой Тверского ГТУ; Минеев Р.В., чл.-кор. АЭН РФ, главный инженер ООО ПТП "Промэнергосервис";

**– по отделению 7 "Средства и системы контроля, управления и автоматизации"** Шелихов Г.С., чл.-кор. АЭН РФ, доктор техн. наук, гл. научн. сотр. ЗАО "НТО "Эксперт" г. Люберцы; Шестаков А.Л., доктор техн. наук, ректор Южно-Уральского ГУ (г. Челябинск);

**– по отделению 8 "Электротехнические материалы и изделия"** Боксимер Э.А., чл. -кор. АЭН РФ, генеральный директор ОАО "Сарансккабель"; Чекалов В.П., чл.-кор. АЭН РФ, генеральный директор НП АО "Техномет-НТ";

**– по отделению 9 "Электрофизические и сверхпроводящие устройства"** Веселовский А.С., чл.-кор. АЭН РФ, зам. директора ИВТ РАН; Медин С.А., чл.-кор. АЭН РФ, доктор техн. наук, зав. лабораторией Института теплофизики экстремальных состояний РАН;

**– по отделению 10 "Электроника и вычислительная техника"** Бекишев А.Т., чл.-кор. АЭН РФ, первый зам. генерального директора – главного инженера ФГУП НПО "Агат"; Бурганский А.И., чл.-кор. АЭН РФ, зам. генерального конструктора ФГУП "НПО Машиностроения"; Корякин Ю.А., чл.-кор. АЭН РФ, первый зам. генерального директора ФГУП "ЦНИИ "Морфизприбор"; Сабуров И.В., чл. -кор. АЭН РФ, генеральный директор ГОУТП "ТЭКОС";

**– по отделению 15 "Высшее техническое образование"** Алексеенко А.Г.; доктор техн. наук, проф., руководитель НАНО Центра МЭИ (ТУ).

**Избраны членами-корреспондентами АЭН РФ:**

**– по отделению 1 "Теоретическая электротехника"** Гришкевич А.А., доктор техн. наук, проф. Южно-Уральского государственного университета;

**– по отделению 2 "Электроэнергетика"** Белый В.Ф., доктор техн. наук, проф., заведующий кафедрой Калининградского ГТУ;

**– по отделению 3 "Электромеханика и силовая преобразовательная техника в промышленности"** Дмитриев В.Н., доктор техн. наук, доцент, зав. кафедрой Ульяновского ГТУ; Коллов В.С., доктор электротехники, зам. генерального директора ОАО "Электропривод"; Пахомин С.А., доктор техн. наук, зав. кафедрой ЮРГТУ (НПИ) (г. Новочеркасск); Пятибратов Г.Я., доктор техн. наук, зав. кафедрой ЮРГТУ (НПИ) (г. Новочеркасск);

**– по отделению 4 "Электротехнические системы и устройства общего и специального назначения"** Григораш О.В., доктор техн. наук, зав. кафедрой Кубанского государственного аграрного университета; Оськин С.В., доктор техн. наук, зав. кафедрой Кубанского государственного аграрного университета.

**– по отделению 5 "Электротехнические системы транспорта и космической техники"** Талалаев В.И., доктор экон. наук, заместитель директора ВНИИАС МПС РФ; Юсупов Р.Х., доктор техн. наук, и.о. зав. кафедрой Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск); Макаров А.К., доктор экон. наук "МАМИ".

**– по отделению 6 "Электротехнология"** Дзлиев С.В., доктор техн. наук, проф. Санкт-Петербургского электротехнического университета (ЛЭТИ); Дмитриев И.Ю., доктор экон. наук, генеральный директор ООО "ППП "Промэнергосервис";

**– по отделению 7 "Средства и системы контроля, управления и автоматизации"** Артемьев Б.В., доктор техн. наук, зав. отделом ЗАО "МНПО "Спектр"; Вопилкин А.Х., доктор техн. наук, генеральный директор ООО "НПЦ "ЭХО+";

**– по отделению 8 "Электротехнические материалы и изделия"** Хренков Н.Н., доктор экон. наук, технический директор ООО "Специальные системы и технологии";

**– по отделению 9 "Электрофизические и сверхпроводящие устройства"** Высоцкий В.С., доктор техн. наук, зав. лабораторией ОАО "ВНИИКП"; Панцырный В.И., доктор техн. наук, зам. директора отделения ВНИИНП;

**– по отделению 13 "Стандартизация и сертификация в электротехнике"** Филиппов А.Ю., доктор экон. наук, директор Института промышленного развития "Информэлектро".

В рамках общего собрания АЭН РФ совместно с Отделениями энергетики, машиностроения, механики и процессов управления (секция Энергетики) РАН была проведена научная сессия по проблеме : "Использование новых физических принципов в электротехнике".

# **Изяслав Борисович Пешков**

**(к 70-летию со дня рождения)**

Доктора технических наук, профессора МЭИ Изяслава Борисовича Пешкова в кабельном сообществе называют человеком года, самым почетным и уважаемым кабельщиком России.

Изяслав Борисович родился 26 мая 1936 г. в городе Раменское Московской области. В 1960 г. окончил с отличием МЭИ по специальности электроизоляционная и кабельная техника. Еще до окончания вуза пришел работать инженером во ВНИИКП. С 1961 г. был назначен заведующим отделом, а с 1965 г. стал заместителем директора по научной работе. С 1970 по 2003 гг., в течение тридцати трёх лет был бессменным директором, генеральным директором ВНИИКП. Параллельно с 1997 по 2001 гг. Изяслав Борисович возглавлял МНТК "Световод". На этом посту И.Б. Пешков обеспечил выполнение комплекса работ по организации производства волоконно-оптических кабелей, в результате чего удалось практически полностью избавиться от импортной зависимости в этой стратегически значимой зоне кабельного производства. С 1990 по 1998 гг. И.Б. Пешков был членом Совета Международной федерации производителей кабелей (ICF). Причём для того, чтобы профессор Пешков мог оставаться членом Совета этой федерации третий срок вмес-



то прописанных уставом двух, пришлось изменить документы — другого такого же по значимости кабельщика из России и стран СНГ участники ICF (а это практически все мировые производители кабелей) не нашли. С 1990 г. Изяслав Борисович — председатель Правления Ассоциации "Электрокабель", а с 1994 г. одновременно и президент этой Ассоциации. Он — президент Международной Ассоциации "Интеркабель", главный редактор журнала "Кабели и провода", Председатель Совета директоров района "Лефортово" Москвы, Председатель Совета директоров ОАО "ВНИИКП".

Изяслав Борисович Пешков — известный учёный в области электротехники, в частности в области электрической изоляции и кабельной техники. Им лично и под его научным руководством вы-

полнено несколько больших циклов научных исследований теории надёжности кабельных изделий и проводов, новейшей технологии их производства, в том числе с использованием достижений оптоэлектроники, радиационной техники и высоковольтной техники. Им опубликовано более 350 печатных трудов, в том числе 64 патента и изобретения, и, что сегодня особенно важно для развития отечественной кабельной техники, он участвовал в написании 8 учебников для студентов вузов. В частности, в этом году вышел новый учебник "Основы кабельной техники" под редакцией И.Б.Пешкова. Его работы получили международное признание. Многие его ученики стали ведущими специалистами кабельной промышленности.

Заслуженный деятель науки и техники РФ, действительный член Международной Академии связи и ряда других отраслевых академий, в настоящее время Изяслав Борисович Пешков возглавляет Академию электротехнических наук РФ.

За выдающиеся заслуги перед Отечеством И.Б.Пешков награждён орденом Ленина, двумя орденами Трудового Красного Знамени, четырьмя медалями. И.Б. Пешков — лауреат Премий Совета Министров СССР и Правительства России.

**Редакция и редколлегия журнала "Электротехника" поздравляют Изяслава Борисовича с юбилеем и желают крепкого здоровья, неиссякаемой энергии и больших творческих успехов.**

Вологодская областная универсальная научная библиотека

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

ЗАО НТФ "Энергопрогресс" сообщает:  
вышла в свет книга  
"Электротехническая энциклопедия"  
Т.1. Под редакцией чл.-кор. РАН А.Ф. Дьякова.  
М.: Изд-во МЭИ, 2005. 316 с.

"Электротехническая энциклопедия" представляет собой справочное издание в 4-х томах, предназначенное для инженерно-технических работников промышленных предприятий и организаций, чья практическая деятельность связана с электроэнергетикой, электротехникой и применением изделий электротехнической промышленности, преподавателей, студентов, а также для широкого круга читателей, интересующихся электротехникой. Статьи в энциклопедии охватывают основные направления теоретической и практической электротехники: теоретическую электротехнику, электроэнергетику; электромеханику; электропривод; электрические аппараты; электротехнологию; электротехнические системы транспорта и космической техники; светотехнику; электротехнические материалы и кабели; силовую и информационную электронику; электроизмерительную технику.

"Электротехническая энциклопедия" подготовлена видными специалистами в различных областях электротехники с целью отразить мировой уровень развития электротехники начала XXI в.

Цена 1-го тома 1500 руб. (включая НДС 10%).

Книгу можно приобрести непосредственно в офисе ЗАО НТВ "Энергопрогресс" по адресу: 109044, Москва, Воронцовский пер., д.2, стр.1, либо перевести денежные средства через отделения Сбербанка РФ.

Контактный телефон: (495) 911-73-24 (Алябьева Наталья Ивановна)  
факс: (495) 911-74-30  
E-mail: [energo-pro@mail.ru](mailto:energo-pro@mail.ru)