

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА** **12 2003**

**С НОВЫМ ГОДОМ!**

---



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

---

#### УЧРЕДИТЕЛИ

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

#### СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

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

---

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

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

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

Подписаться на журнал можно в почтовых отде-  
лениях связи по объединенному каталогу Депар-  
тамента почтовой связи. Подписной индекс —  
71111.

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

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

При перепечатке ссылка на журнал «Электротехника»  
обязательна.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения  
авторов статей.

За содержание рекламных материалов редакция  
ответственности не несет.

Рукописи статей не возвращаются.

---

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

---

**Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: 361-95-96**

**E-mail [elektrotechnika@mtu-net.ru](mailto:elektrotechnika@mtu-net.ru)**

---

Редактор отдела О.В. Кунавина.  
Научный редактор Л.А. Романова.  
Редакторы Т.В. Штанько, О.В. Кротова

---

Сдано в набор 29.09.2003. Подписано в печать 14.11.2003. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 98

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

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Иванов А.М., Иванов С.А.** Комбинированные энергоустановки с ИКЭ — основа эффективно-го использования топливно-энергетических ресурсов XXI века ..... 2

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ

- Глазунов В.Ф., Пикунов В.В., Митрофанов А.С.** Методика определения параметров электро-двигателя с осевым полем от постоянных маг-нитов ..... 7

- Акимов Л.В., Долбня В.Т.** Об особенностях ис-пользования цепных дробей для аналитическо-го упрощения передаточных функций электро-механических систем ..... 11

- Шетат Б., Ходжа Дж.** Использование искусствен-ных нейронных сетей для диагностики неис-правности асинхронного электропривода в режиме реального времени ..... 16

- Казakov Ю.Б., Сайкин М.С., Щелыкалов Ю.Я.** Учёт перераспределения ферромагнитных час-тиц в магнитной жидкости, находящейся в неоднородном магнитном поле герметизатора.. 20

- Вилькин М.А., Семёнов Ю.И., Никифоров Ю.Н.** Исследование структуры и электро-сопротивле-ния коллекторных плёнок, образованных щёт-ками на основе твёрдых смазок с различной электропроводностью ..... 24

- Власов А.Б.** Прогнозирование долговечности кон-тактных соединений по данным тепловизионной диагностики ..... 27

## ЭЛЕКТРОПРИВОД

- Волков А.В.** Оптимальное по быстродействию век-торное регулирование статорного тока в частот-но-управляемых асинхронных электроприво-дах с широтно-импульсной модуляцией ..... 34

- Абрамов Б.И., Демиденко В.И., Коган А.И., Моцехейн Б.И., Парфёнов Б.М., Портной Т.З.** К вопросу о выборе вида электропривода для одноковшовых экскаваторов в современных условиях ..... 43

## НАУЧНЫЕ ГИПОТЕЗЫ

- Копылов И.П.** Гелиоэлектромеханика и солнечные циклы ..... 48

## ТЕХНОЛОГИЯ

- Минеев А.Р., Игнатов И.А., Дмитриев И.Ю., Попов В.Н.** Варианты конструкций электротер-мических установок для электрошлаковой очи-стки поверхности слитков в зависимости от ме-тода восполнения расходуемой на очистку энергии ..... 51

## ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

- Сивяков С.К.** Вакуумные коммутационные аппараты нового поколения ..... 54

## ДИСКУССИЯ

- Бихман Р.И., Долкарт В.М.** К вопросу о созда-нии линейного электромагнитного двигателя... 57

- Николай Николаевич Шереметьевский** ..... 60

- Перечень статей, опубликованных в журнале "Электротехника" в 2003 г.** ..... 61

- Феликс Иванович Ковалёв** ..... 65

## CONVERTERS

- Ivanov A.M., Ivanov S.A.** Combined energy installations with ICE — effective utilization base of XXI century energy budgets ..... 2

## RESEARCH AND CALCULATIONS

- Glasunov V.F., Pikunov V.V., Mitrofanov A.S.** Parameters determination methodology of motor with axial magnetic field, producing by permanent magnets ..... 7

- Akimov L.V., Dolbnya V.T.** About the features of chain fractions use in transfer function analytic simplification of electromechanics systems ..... 11

- Shetat B., Hodga Dg.** Artificial neural network usage for asynchronous motor malfunction diagnostics in real-time operation mode ..... 16

- Kazakov Y.B., Saykin M.S., Shelikalov Y.A.** Ferromagnetic particles rearrangement calculation in magnetic liquid which is situated in nonuniform magnetic field of sealed package ..... 20

- Vilkin M.A., Semenov Y.I., Nikiforov Y.N.** Structure and electrical resistivity research of collectors films which arise from slip-ring brushes on the base of solid lubes with different electrical resistivity ..... 24

- Vlasov A.B.** Conductor joints durability prediction on the basis of thermal imaging diagnostics ..... 27

## ELECTRIC DRIVE

- Volkov A.V.** Optimal speed vector control of stator current in frequency-control asynchronous electric drive with pulse-width modulation ..... 34

- Abramov B.I., Demidenko V.I., Kogan A.I., Mocohein B.I., Parfenov B.M., Portnoy T.Z.** To the question about electric drive selection for one-busket excavator in modern state of affairs.. 43

## SCIENCE HYPOTHESES

- Kopilov I.P.** Helio-electromechanics and solar cycles ..... 48

## TECHNOLOGY

- Mineev A.R., Ignatov I.A., Dmitriev I.Y., Popov V.N.** Electrothermal installations construction variants for electroslag ingot surface cleaning, depending on the method of consumable energy compensation ..... 51

## FROM WORKING EXPERIENCE

- Sivayakov S.K.** New generation of vacuum commutation apparatus ..... 54

## DISCUSSION

- Bihman R.I., Dolkart V.M.** To the question about linear electromagnet motor formation ..... 57

- Nickolai Nickolaevich Sheremetevskiy** ..... 60

- The list of articles that were published in journal "Electrotechnics" in 2003** ..... 61

- Felicks Ivanovich Kovalev** ..... 65

## Комбинированные энергоустановки с ИКЭ – основа эффективного использования топливно-энергетических ресурсов XXI века

ИВАНОВ А.М., доктор техн. наук, академик РАЭН, ИВАНОВ С.А.

МНПО "ЭКОНД"

*Рассмотрена возможность создания ёмкостно-аккумулирующей электростанции на базе суперконденсаторов повышенной энергоёмкости – импульсных конденсаторов энергоёмких (ИКЭ) МНПО "ЭКОНД", основанных на эффекте двойного электрического слоя и имеющих ёмкость десятки и сотни фарад при напряжении порядка 350 В и более в одном модуле. Показана эффективность использования ИКЭ в городском рельсовом транспорте – трамвае.*

Актуальная в настоящее время проблема обеспечения графика нагрузки электроэнергетической системы (ЭЭС) является долговременной, нуждающейся в постоянном развитии и совершенствовании средств ее решения.

Современные ЭЭС имеют характерные особенности:

- неуклонный рост неравномерности графиков нагрузки; отличительной чертой производства электроэнергии является необходимость выработки электростанциями в каждый момент времени такого ее количества, какое требуется потребителям, однако нагрузка колеблется (и притом существенно) как в течение суток, так и в течение недели, месяца, года;

- увеличение крутизны графиков нагрузки, наклон утренних максимумов в центрах нагрузок может достигать 1–3% в минуту [1];

- неизбежное укрупнение оборудования электростанций, что повышает их экономичность, но приводит к снижению маневренности; это не позволяет эффективно работать по "крутым" графикам нагрузки, снижает экономичность покрытия пиков мощности; требования к резким темпам набора и сброса нагрузки можно выполнить лишь при наличии достаточного числа высокоманевренных агрегатов мощностью 100, 150, 200 МВт, но с укрупнением оборудования их доля неизбежно снижается [1], однако децентрализация базы при таких мощностях позволяет решать "пиковые" нагрузки.

Преобразование различных форм энергий в электрическую практикуется в силу многих причин. В некоторых случаях просто невозможно эффективно использовать энергию, не превратив ее в электрическую. Однако преобразование теп-

ловой энергии, заключенной в ископаемом топливе, сопровождается колоссальными потерями. На самом деле при сжигании угля в топке котла или при распаде урана в реакторе выделяется гораздо больше тепла, расходуемого на генерирование электричества или теряемого при передаче к месту использования. Количество выработанной электроэнергии, которое может быть реально передано потребителям для использования составляет примерно 30% энергии [2]. Это – результат принципиальной неэффективности преобразования любой формы энергии в электрическую вследствие второго закона термодинамики.

Особенно велики потери, когда полученная электрическая энергия снова преобразуется в тепло на месте ее использования.

Использование возобновляемых энергоресурсов (гидроэнергия, солнечная энергия, ветровая энергия, энергия биомассы, волновая энергия и геотермальная энергия) позволяет получать энергию практически у потребителя без потерь передач ее на большие расстояния, обеспечивая при этом независимость от крупных электростанций. Они обладают неиссякаемостью и энергоёмкостью (полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли за неделю, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и урана [3]) и в дальнейшем позволяют отказаться от низкоэффективного способа производства энергии.

Необходимы поиски мер, которые смогли бы комплексно решить указанные проблемы.

**Суперконденсатор – новая структурная единица в электроэнергетической системе**

Один из способов устранения противоречия

между источниками и потребителями электроэнергии – включение в состав энергосистем накопителей энергии (НЭ), обеспечивающих, с одной стороны, равномерную нагрузку электростанций, а с другой, – выравнивание переменной части графика электропотребления [4].

Помимо этого существует ряд электроэнергетических задач, которые могут быть частично или полностью решены с помощью НЭ:

- повышение пропускной способности межсистемных связей;
- стабилизация частоты и напряжения, повышение качества электроэнергии;
- улучшение статической и динамической устойчивости и в конечном счете общее повышение надежности работы ЭЭС.

Таким образом, введение в ЭЭС суперконденсаторов в качестве самостоятельной структурной единицы продиктовано объективными причинами.

НЭ можно разделить на группы по трем основным характеристикам: номинальной энергоемкости или мощности, быстродействию, требованиям к месту установки. Эти характеристики в основном будут определять возможности использования НЭ в энергосистемах.

НЭ разделяются на две группы: 1) маневренные с малым значением времени реверса и большой мощности (до 1 с), но рассчитанные на небольшую (до  $10^9$  Дж) энергоемкость (химические, инерционные, электрические); 2) не обладающие большим быстродействием, но рассчитанные на энергоемкость более  $10^{14}$  Дж [1].

Новые силовые полупроводниковые приборы, обладающие высоким быстродействием и низкими потерями, позволили создать статические преобразователи для привода скоростных электрических машин, работающих в чередующемся двигательно-генераторном режиме и являющихся звеном преобразования накапливаемой энергии. И хотя в мире есть несколько фирм, таких как "Active Power" и "Beacon Power", специализирующихся на маховичных энергосистемах, маховики все же, пока еще не доступны для широкого применения, поскольку требуются сложные, а соответственно дорогостоящие технологии и системы изготовления, оснастки и управления ими.

Накопители электрической энергии (НЭЭ) обладают большим диапазоном энергоемкости и высоким быстродействием. Следовательно, они могут использоваться как для выравнивания

графиков нагрузки, так и для повышения устойчивости и надежности ЭЭС. НЭЭ – единственный тип накопителей, аккумулирующих непосредственно электрическую энергию, с высоким КПД. Они инвариантны к месту установки, могут быть расположены в центрах нагрузки и непосредственно у потребителя. НЭЭ бесшумны в работе, достаточно надежны, так как не имеют движущихся частей, экологически чисты в производстве и утилизации. Следовательно, их можно комплексно использовать в ЭЭС [4].

В последние годы появилась реальная возможность создания емкостно-аккумулирующей электростанции на базе суперконденсаторов повышенной энергоемкости. В СССР на базе конденсаторов аномальной емкости был создан и прошел опытно-промышленную эксплуатацию НЭЭ, мощность которого в модели ЭЭС составляет 10 кВт. Уровень запасаемой энергии определяется типом аккумулирующего элемента (АЭ) и достигает 30 кДж и более [1].

Исходя из многолетней научно-технической и эксплуатационной практики, такими накопителями в настоящее время могут являться ИКЭ МНПО "ЭКОНД", основанные на эффекте двойного электрического слоя и имеющие емкость десятки и сотни фарад при напряжении примерно 350 В в одном модуле и более (рис. 1).

Модульная конструкция позволяет говорить о создании достаточно мощной батареи из конденсаторов на высокое напряжение, выдерживающих токи в несколько килоампер, энергоемкость батареи может быть доведена до  $10^{11}$ – $10^{12}$  Дж. Это дает возможность использовать такую батарею в качестве АЭ накопителя энергетического назначения. Время хранения энергии в таких НЭ более сотен часов. ИКЭ энергоемкостью 1000 МДж при напряжении десятки киловольт может иметь объем примерно 100–200 м<sup>3</sup> при стоимости менее  $10^6$  дол. США и высоком КПД. При постоянной времени саморазряда порядка 100 ч суммарный КПД зарядно-разрядного цикла должен составлять 90%. ИКЭ не имеет отри-

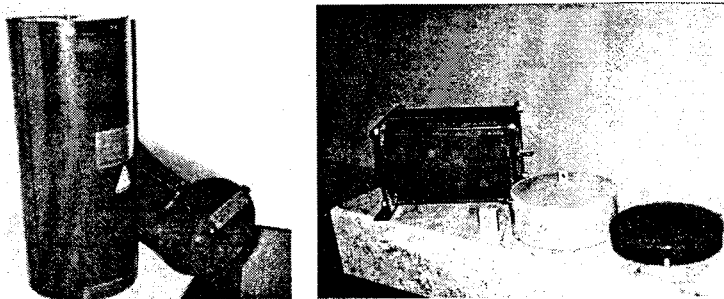


Рис.1. Суперконденсаторы МНПО "ЭКОНД"

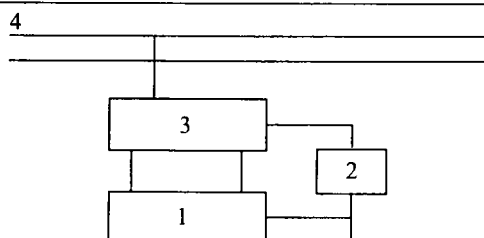


Рис.2. Блок-схема накопительного блока:

1 – блок суперконденсаторов; 2 – блок управления; 3 – преобразователь; 4 – линии ЭЭС

цательного экологического воздействия; он может быть расположен практически в любом месте. Блок-схема показана на рис.2.

ИКЭ следует рассматривать как перспективные устройства, которые позволят комплексно решать проблемы современных ЭЭС. Они могут быть установлены практически в любой точке ЭЭС, а также для выравнивания графиков нагрузки и повышения ее устойчивости.

Рассмотрим алгоритм оптимизации параметров ИКЭ и выбора оптимальной структуры генерирующих мощностей ЭЭС.

На рис.3 приведен график электрических нагрузок ЭЭС, который при решении рассматриваемой задачи является основным исходным [1].

Пусть для покрытия графика нагрузки в энергосистеме без ИКЭ необходимая суммарная мощность ЭС, работающих в базовой части графика нагрузок, составляет  $P_{б1}$ , в полупиковый –  $P_{п1}$  и пиковый –  $P_{п1}$ . Увеличим мощность станций, работающих в базовой части графика нагрузки на  $\Delta P_6$ , при этом вырабатывается избыточная энергия, которая при наличии ИКЭ аккумулируется в нем. Затем она используется при прохождении пика нагрузки. Количество энергии, полученное от ИКЭ, будет на значение потерь меньше энергии, принятой им от ЭЭС в режиме заряда. Потери энергии в ИКЭ за один зарядно-разрядный цикл состоят из трех состав-

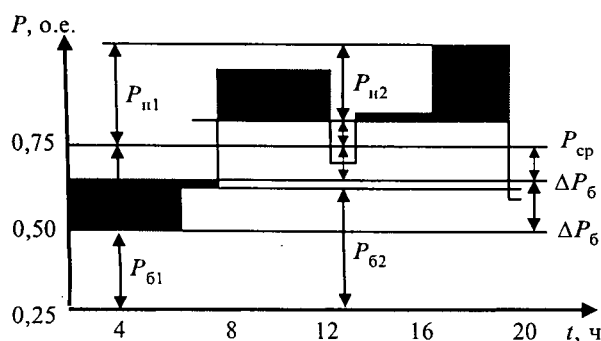


Рис.3. График изменения структуры генерирующих мощностей ЭЭС при включении в нее НЭ различной мощности и энергоемкости

ляющих: потери в режиме заряда, в режиме хранения и в режиме выдачи. Необходимо учесть, что  $\Delta P_6$  невозможно выбрать произвольно.  $\Delta P_6$  должна быть кратной мощности одного из блоков, установленных на станциях, работающих в базовой части графика нагрузки. Мощность полупиковых установок уменьшится на  $\Delta P_6$ , а пиковых – на  $P_n$ , т.е. изменится вся структура генерирующих мощностей системы. При этом необходимая для выравнивания графика нагрузок энергоемкость ИКЭ станет равной избыточной энергии, вырабатываемой ЭС, работающими в базовом режиме. Мощность ИКЭ находится из значения  $\Delta P_6$ , определяющего наибольшую мощность его заряда, и мощность, выдаваемую им во время прохождения пика нагрузки. Длительность работы ИКЭ в режиме разряда (во время прохождения максимума нагрузки) меньше длительности его работы в режиме заряда, соответственно, выдаваемая мощность больше принимаемой, равной  $\Delta P_6$ . Поэтому значение мощности ИКЭ  $P_n$  выбирается в соответствии с наибольшей мощностью, отдаваемой им для покрытия пиковой части графика нагрузки.

Мероприятия по выравниванию графиков электропотребления должны сочетаться с возможностями развития таких потребителей, которые смогут обеспечить выравнивание графиков нагрузки, не противореча социальным и топливно-энергетическим проблемам, а также проблеме охраны окружающей среды. К числу данных мероприятий относится и использование электротранспорта.

#### Решение задач неравномерности графиков нагрузки электроэнергетической системы на электротранспорте

Нами совместно с рядом учёных Москвы предложена новая концепция развития электротранспорта, основанная на создании современного электропривода с использованием ИКЭ непосредственно на борту транспортного средства (ТС) [5].

Эти конденсаторы уже нашли широкое применение в промышленности, в том числе в комбинированных энергоустановках, широко используемых в железнодорожном транспорте (гарантированный запуск дизелей маневровых и магистральных тепловозов (мощностью до 3000 л.с.), использование в силовых цепях постоянного тока собственных нужд тяговых и электроподстанций [7] и др.), что дало экономию на железных дорогах России около 670000 дол. США [6].

Размещение ИКЭ непосредственно на борту ТС позволит снизить потребление электроэнер-

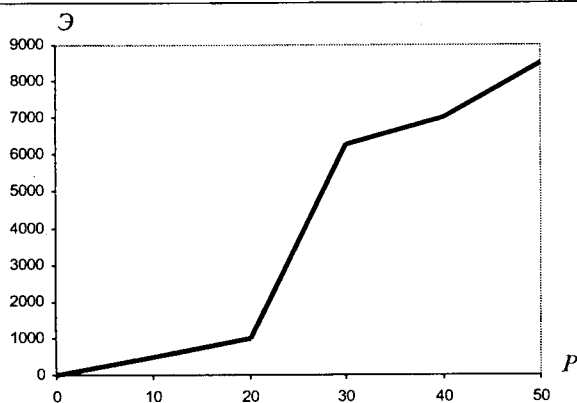


Рис.4. Зависимость эксплуатационных расходов Э (дол. США) от снижения нагрузки P (МВт)

гии, улучшить ходовые характеристики подвижного состава и существенно выровнять нагрузку в тяговой сети. Выравнивание нагрузки в сети способствует повышению ресурса оборудования: подстанции, линии электроснабжения, трансформаторов и т.д. По экспертной оценке (как отечественной, так и зарубежной) эффективность от повышения ресурса силового энергетического оборудования соизмерима с эффективностью от энергосбережения. Это можно заметить на примере нелинейной зависимости ежедневной экономии эксплуатационных расходов от снижения нагрузки в одной из ЭЭС США (рис. 4) [7].

Поскольку имеется опыт участия в крупных проектах по созданию гибридных ТС с применением ИКЭ в качестве буфера, такой проект исследовательского центра NASA по созданию гибридного транзитного электробуса с использованием 1,6 МДж накопительной системой позволяет нам провести оценочный анализ работы ИКЭ на борту электроподвижного состава.

Рассмотрена эффективность использования ИКЭ в городском рельсовом транспорте, например в трамвае.

В нормальном графике движения трамвая пуско-тормозной цикл груженого вагона общей массой  $M = 28,4$  т характеризуется следующими параметрами: разгон до 36 км/ч, торможение до полной остановки со скорости 30 км/ч.

Исходя из этих требований и с учетом уникальных технических характеристик ИКЭ, предлагаем проанализировать их работу в составе электропривода одного вагона.

Во время разгона, т.е. при преодолении сил инерции, связанных с изменением скорости движения, необходимо сообщить вагону мощность, равную приращению кинетической энергии в зависимости от изменения скорости и энергии,

потраченной на сопротивление:

$$P_p = \frac{m a v_{\max}}{2 \eta_6} + \frac{\psi m g v_{\max} + k_b F_a v_{\max}^3}{2 \eta_6}, \quad (1)$$

где  $a$  – ускорение движения вагона, м/с<sup>2</sup>;  $\eta_6$  – КПД передачи мощности ИКЭ – ведущее колесо;  $v_{\max}$  – максимальная скорость движения вагона, м/с;  $\psi$  – коэффициент дорожного сопротивления;  $m$  – масса вагона, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $k_b$  – коэффициент сопротивления воздуха;  $F_a$  – площадь поперечного сечения вагона, м<sup>2</sup>.

Процент энергии, выдаваемой ИКЭ за время разгона, можно получить из соотношения:

$$\frac{E_{\text{нак}}}{E_{\text{отд}}} = \frac{C U_1^2}{2} \bigg/ \frac{C}{2} [U_1^2 - U_2^2], \quad (2)$$

где  $E_{\text{нак}}$  – энергия накопленная, Дж;  $E_{\text{отд}}$  – энергия отдаваемая, Дж;  $C$  – электрическая емкость ИКЭ, Ф;  $U_2$  – конечное напряжение, В;  $U_1$  – начальное напряжение, В.

При условии, что

$$U_2 = U_1/2, \quad (3)$$

т.е. конечное напряжение разряда соответствует 50% начального (наиболее рациональное), подставляя (3) в (2), получим:

$$\frac{E_{\text{нак}}}{E_{\text{отд}}} = \frac{C U_1^2 \cdot 8}{2 \cdot 3 C U_1^2} = \frac{4}{3}, \quad (4)$$

т.е. около 75% энергии при 50% разряде.

Так как ИКЭ работает в составе электрической цепи, то необходимо учесть просадку напряжения на них в момент потребления энергии:

$$\Delta U = I r; \quad I = U/P, \quad (5)$$

где  $I$  – ток в цепи, А;  $r$  – внутреннее сопротивление ИКЭ, Ом;  $U$  – напряжение в цепи, В;  $P$  – мощность, развиваемая тяговым электродвигателем, Вт.

Тогда выражение (3) запишется как:

$$U_2 = \frac{U_1 - \Delta U}{2}. \quad (6)$$

Одной из основных отличительных черт этой системы является возможность регенерации энергии во время торможения:

$$E_{\text{рег}} = \frac{m v^2}{2} - \left( \frac{f m g v t_{\text{рег}}}{2} + \frac{k_b F_a v^3 t_{\text{рег}}}{2} \right) \eta_6, \quad (7)$$

где  $t_{\text{рег}}$  – время регенеративного торможения, с.

Дозаряд ИКЭ может происходить во время остановки вагона. Продолжительность заряда будет определяться значением энергии, не восполнен-

ной во время регенеративного торможения.

Энергия, затрачиваемая на разгон вагона до скорости 36 км/ч, составляет 1770 кДж (0,5 кВт·ч). Годовой расход электроэнергии на один вагон  $65,7 \cdot 10^3$  кВт·ч. При текущей стоимости 0,02 дол. США за 1 кВт цена расходуемой электроэнергии на один вагон составит 1320 дол. США за год.

Потенциально возможный в указанном диапазоне скоростей объем энергии регенерации, накапливаемый ИКЭ, составляет 875 кДж.

Потребление энергии сокращается на 40%. Годовая экономия от этого составит 660 дол. США. Экономия от парка трамвайных вагонов г. Москвы (порядка 2000 шт.) составит порядка 1 320 000 дол. США.

Аналогичные оценки проведены для поездов метро, пригородных поездов, троллейбусов и т.п.

С учетом повышения ресурса силового оборудования ЭЭС (тяговые подстанции, линии электроснабжения, трансформаторы и т.д.), за счет снижения пиковой мощности сети в 4 раза, срок окупаемости будет составлять примерно 2 года.

## Выводы

1. "Раскачка" энергосетей при оперативных или случайных изменениях нагрузки потребителей, ведущих к скорому износу, а часто и выходу из строя дорогостоящего коммутационного и преобразовательного электрооборудования, требуют повышения его надежности в снятии и/или обеспечении пиковых нагрузок в промышленных электросетях, тяговых подстанциях и т.п.

2. Эксплуатация электротранспорта (трамваев, троллейбусов, метропоездов и пригородных поездов) требует повышения уровня безопасности, надежности и экономичности.

3. Электропитание крупных ответственных потребителей требует обеспечения бесперебойности и повышения надежности энергоснабжения.

4. Оснащение аппаратуры связи, энергопитания рентгеновской аппаратуры, охранных и контрольных систем импульсных потребителей преобразователями мощности и т.п. на основе ИКЭ повышает их мобильность и надежность.

5. Эксплуатация различных транспортных средств, передвижных устройств и механизмов требует весомых финансовых расходов. Причем из-за роста грузопассажирских потоков, особенно в крупных городах, из-за назревшей необходимости улучшения экологической обстановки и реконструкции инфраструктуры в транспортной сфере эти расходы существенно увеличива-

ются (например, только на утилизацию отслуживших свой срок аккумуляторных батарей в Москве тратится 40 млн. руб. в год) [5]. В связи с этим растут требования к экономии энергоресурсов, повышению надежности и экологической безопасности всех видов транспорта при его эксплуатации: наземного, подземного, железнодорожного, водного, дорожно-строительной и коммунальной техники и т.д.

6. Ухудшение экологической обстановки по стране и особенно в крупных мегаполисах (по данным МПС [8] только на долю маневровых тепловозов приходится 10–15% вредных выбросов в атмосферу), ограниченные запасы нефтегазовых ресурсов при возрастающем их потреблении требуют кардинальных изменений – перехода на автономное и децентрализованное энергоснабжение, достаточное для каждого потребителя. Для транспорта это означает переход от использования энергии двигателей внутреннего сгорания (ДВС) к комбинированным энергоустановкам (дизель-генератор или турбогенератор + суперконденсатор + тяговый электродвигатель), которые значительно более экономны в потреблении топлива и существенно более экологически чисты. В перспективе – полная замена ДВС на экологически чистый электроэнергетический транспорт (топливные элементы + суперконденсатор + тяговый электродвигатель).

*Авторы благодарят за поддержку создания концепции современного электропривода ведущих российских ученых: В.И. Попкова, О.Н. Фаворского, Н.С. Лидоренко, К.С. Демирчяна, О.Н. Дидманидзе.*

## Список литературы

1. Веников В.А., Астахов Ю.Н., Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах. М.: Энергия, 1989.
2. Ревель П., Ревель Ч. Среда нашего обитания. Кн. 3. Энергетические проблемы человека: Пер. с англ. М.: Мир, 1995.
3. Гук С. Факты и Документы // Возобновляемая энергия. 1998. № 3.
4. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Иванов А.М. и др. Функциональные возможности накопителей электрической энергии в энергосистемах // Изв. РАН. Электричество. 1983. № 4.
5. Иванов А.М., Лидоренко Н.С., Шакарян Ю.Г. и др. Современная концепция развития городского электротранспорта. М.: МНПО "ЭКОНД", 2002.
6. Долдин В.М., Алексеев Е.Н., Выходцев Л.В. Применение накопителей энергии в системах электропитания // Локомотив. 1999. № 12.
7. Папков Б.В. О мировом опыте формирования и внедрения дифференцированных тарифов на электроэнергию // Энергоменеджер. Ежеквартальный бюллетень. 2000. №17.
8. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов. М.: УМК МПС России, 2000.



## Методика определения параметров электродвигателя с осевым полем от постоянных магнитов

ГЛАЗУНОВ В.Ф., ПИКУНОВ В.В., МИТРОФАНОВ А.С.

Разработана методика определения основных параметров синхронного двигателя с осевым полем от постоянных магнитов, использующая как расчетный, так и экспериментальный способы. Предложено экспериментально определять активное сопротивление и собственную индуктивность фазы обмотки статора, потокоцепление статора от постоянного потока магнита ротора, число фаз и число пар полюсов машины. Расчетным методом определены собственная и взаимная индуктивности фаз обмотки статора и момент инерции ротора. Приведены переходные процессы некоторых переменных двигателя, при моделировании использованы параметры, рассчитанные по разработанной методике.

Одним из вариантов построения электродвигателя, позволяющим уменьшить габариты, массу, энергопотребление и стоимость электропривода систем автоматики, бытовой и вычислительной техники, принято считать его прямоприводную конструкцию с осевым полем от постоянных магнитов. К особенностям такого электродвигателя относят наличие магнитной системы торцевого типа с магнитным потоком, направленным вдоль оси вращения ротора, и плоских катушек статора, расположенных между магнитом ротора и ярмом статора (рис.1).

В процессе анализа и синтеза систем электропривода с указанным электродвигателем возникает задача выбора его математической модели и определения ее параметров. При этом под параметрами понимают совокупность констант или функций, которые однозначно соответствуют принятой математической модели электрической машины.

Известные методики определения параметров электродвигателя принято делить на расчетные и экспериментальные. Расчетные, как правило, основаны на теории электромагнитного поля в рабочем зазоре электрической машины и дают весьма точные результаты, но трудоемки в практическом применении, поскольку требуют использования достаточно сложного математического аппарата (например, уравнений Максвелла). Экспериментальные наоборот более просты и прозрачны, но для их реализации, необходимы дорогостоящие лабораторные приборы и установки, дающие к тому же приближенные численные результаты. В этой ситуации есте-

*The method of defining the main parameters of permanent magnets axial field synchronous motor was worked out. Both calculation and experimental techniques were used in the method. It was suggested to define experimentally the active resistance and own inductance of stator winding phase, stator current cohesion of constant rotor magnets, the number of phases and the number of machine pole pairs. Stator winding phases own and mutual inductance and rotor inertia moment was determined with the calculating technique. The transitional processes of some motor variables were described. The parameters calculated with the technique worked out were used in modeling.*

ственно возникает идея разработки методики, сочетающей как расчетные, так и экспериментальные способы определения параметров. Такой подход дает возможность в наиболее полной мере реализовать преимущества и минимизировать недостатки обоих указанных способов.

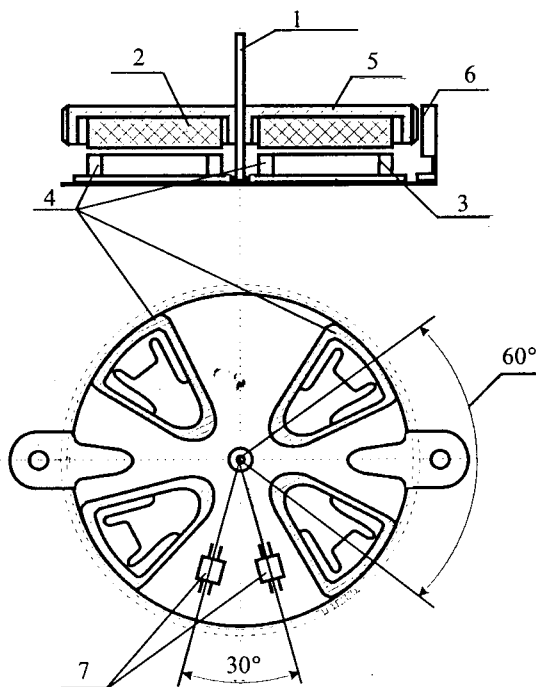


Рис.1. Конструкция прямоприводного электродвигателя с осевым полем от постоянных магнитов:

1 – рабочий вал ротора; 2 – постоянный магнит ротора кольцевой формы; 3 – ярмо статора; 4 – обмотки (катушки) статора; 5 – диск ротора с зубцами датчика скорости; 6 – считывающая головка датчика скорости; 7 – преобразователи Холла

В математической модели электродвигателя с осевым полем от постоянных магнитов (рис.1) в соответствии с известными математическими моделями [1–3] в качестве параметров могут быть приняты: активное сопротивление фазы обмотки статора ( $R$ ) и ее индуктивность ( $L$ ); взаимная индуктивность фаз обмотки статора ( $M$ ); потокосцепление статора с полем постоянных магнитов ( $\Psi_{п.м}$ ); число фаз ( $m$ ); число пар полюсов ( $p$ ); момент инерции ротора ( $J$ ).

Активное сопротивление и собственную индуктивность фазы обмотки статора целесообразно определять путем непосредственного измерения цифровым омметром и измерителем индуктивности соответственно с высоким классом точности [4].

При известных обмоточных данных (число витков, диаметр провода) и геометрии статорных катушек (рис.1) собственная индуктивность фазы обмотки статора и взаимная индуктивность фаз могут быть определены расчетным путем.

При этом статорную катушку реальной конфигурации необходимо заменить на эквивалентную, т.е. равную по значению индуктивности катушку, но с изученной стандартной геометрией и поэтому с известной справочной формулой вычисления индуктивности.

Например, в качестве эквивалентной удобно принять круговую катушку без сердечника с многослойной обмоткой прямоугольного сечения (рис.2), собственная индуктивность которой может быть определена выражением [5]:

$$L = \frac{\pi}{4} \mu_0 w^2 \frac{d}{\alpha} (K_\alpha - k), \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная;  $w$  – число витков в обмотке;  $d$  – средний диаметр обмотки;  $K_\alpha$  – коэффициент, значения которого определяются по таблицам [5] в зависимости от отношения  $\alpha = a/d$  ( $a$  – длина катушки);  $k$  – величина, учитывающая уменьшение индуктивности, обусловленное конечностью радиальной толщины  $r$  обмотки; значения  $k$  определяются по таблицам [5] в зависимости от значений  $\rho = r/d$  и  $\gamma = \rho/\alpha = r/a$ .

При эквивалентировании следует руковод-

ствоваться тем, что катушка, основанием которой служит  $n$ -угольник, близка по индуктивности круговой катушке, имеющей одинаковые с ней длину, число витков и площадь основания, причем это соотношение тем точнее, чем длиннее катушки и чем больше число сторон многоугольника [5].

Тогда геометрические размеры эквивалентной круговой катушки (рис.2) могут быть определены следующим образом [5]:

средний диаметр катушки

$$d = l/\pi, \quad (2)$$

где  $l$  – длина среднего контура обмотки, определяется непосредственным измерением реальной катушки;

радиальная толщина катушки

$$r = S/(\pi d), \quad (3)$$

где  $S$  – площадь основания обмотки, необходимые данные для расчета которой определяются измерением.

Следует отметить, что при некоторых конфигурациях реальной обмотки возможны и другие, отличные от рис.2, рациональные формы эквивалентной обмотки и в связи с этим другие приемы эквивалентирования и другие формулы вычислений. При этом критериями по-прежнему будут простота вычислений при достижении приемлемой точности.

Взаимная индуктивность фаз обмотки статора (для случая одинаковых катушек прямоугольного сечения с параллельными осями) может быть определена по выражению [5]:

$$M = \frac{\pi}{32} \mu_0 w^2 \frac{d^4}{a^2} \left[ \frac{Z_1}{b_1} + \frac{Z_2}{b_2} \right], \quad (4)$$

где  $b_1 = \sqrt{a^2 + y^2}$ ;  $b_2 = y$ ;  $y$  – расстояние между осями катушек;

$$Z_1 = \rho_2^2 - \frac{1}{2} \alpha_1^2 \rho_2 \rho_4 P_2(\gamma_1) + \frac{1}{8} \alpha_1^4 (2\rho_6 \rho_2 + 3\rho_4^2) P_4(\gamma_1) - \frac{5}{32} \alpha_1^6 (\rho_8 \rho_2 + 6\rho_6 \rho_4) P_6(\gamma_1) + \dots; \quad (5)$$

$\alpha_1 = d/2b_1$ ;  $\rho_2, \rho_4, \dots$  – функции, значения которых приведены в таблицах [5] в зависимости от  $(2\rho)^2 = (2r/d)^2$ ;  $P_2(\gamma_1), P_4(\gamma_1) \dots$  – полиномы Лежандра;  $\gamma_1 = a/b_1$ ;  $Z_2$  – определяется так же, как  $Z_1$ , но с заменой  $\alpha_1$  на  $\alpha_2 = d/2b_2 = d/2y$  и  $\gamma_1$  на  $\gamma_2 = 0$ .

Потокосцепление статора с полем постоянных магнитов  $\Psi_{п.м}$  может быть экспериментально определено из соотношения:

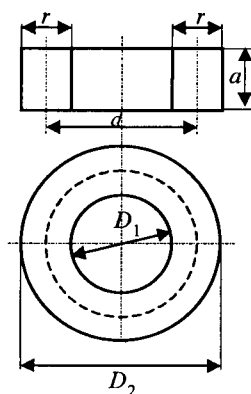


Рис.2. Многослойная круговая обмотка прямоугольного сечения

$$\Psi_{п.м} = \frac{E}{\omega}, \quad (6)$$

где  $E$  и  $\omega$  – соответственно амплитуда и частота электродвижущей силы (ЭДС), наведенной постоянным магнитом в разомкнутой обмотке статора двигателя при принудительном внешнем вращении ротора.

Для практической реализации определения параметра  $\Psi_{п.м}$  осуществляют вращение ротора от внешнего двигателя и с помощью измерительных устройств (например, осциллографа) определяют амплитуду  $E$  и частоту  $\omega$  указанной ЭДС. Следует отметить, что на значение вычисленного по соотношению (6) параметра уровень частоты вращения ротора влияния не оказывает. Необходимо лишь одновременное считывание значений  $E$  и  $\omega$  с последующим вычислением их соотношения.

Число фаз  $m$  электродвигателя с осевым полем от постоянных магнитов целесообразно определять путем непосредственного анализа типа соединения статорной обмотки.

Число пар полюсов  $2p$  определяют экспериментально с помощью магнитной стрелки, располагаемой около постоянного магнита. При повороте магнита вокруг своей оси магнитная стрелка будет менять свое направление при смене полярности магнитных полюсов.

Для получения суммарного момента инерции определяют расчетным методом моменты инерции всех частей ротора. Очевидно, что полный момент инерции ротора будет равен сумме моментов инерции его частей т.е.

$$J_{рот} = J_{магн} + J_{диск.рот} + J_{раб.в}, \quad (7)$$

где  $J_{магн}$ ,  $J_{диск.рот}$ ,  $J_{раб.в}$  – соответственно моменты инерции магнита, диска ротора и рабочего вала.

Расчет момента инерции отдельной компоненты будет менее трудоемким, если разбивать ее на такие части, моменты инерции которых могут быть легко вычислены по формулам, приведенным в справочной литературе.

Для определения моментов инерции дисков  $J_i$  и колец  $J_k$  можно использовать выражения (8), (9) соответственно [6]:

$$J_i = \frac{M_i (D_i/2)^2}{2}; \quad (8)$$

$$J_k = \frac{M_k (D_{k1}^2 - D_{k2}^2)}{2 \cdot 4}, \quad (9)$$

где  $D_{k1}$ ,  $D_{k2}$  – наибольший и наименьший диа-

метры  $k$ -го кольца;  $M_i$ ,  $M_k$  – массы дисков и колец, соответственно, могут быть найдены по следующим соотношениям:

$$M_i = \rho_i V_i; \quad M_k = \rho_k V_k, \quad (10)$$

где  $\rho_i$ ,  $\rho_k$  – плотность материалов дисков и колец соответственно;  $V_i$ ,  $V_k$  – объемы.

Очевидно, что суммарный момент инерции отдельной компоненты ротора

$$J_{\Sigma} = \sum_1^i J_i + \sum_1^k J_k. \quad (11)$$

По разработанной методике определены параметры синхронного микродвигателя с осевым полем от постоянных магнитов лентопротяжного механизма БС-2 кассетного магнитофона "Вега 122С".

Измерение прибором типа "измеритель  $R$ ,  $L$ ,  $C$  цифровой Е7-8" для фазы статорной обмотки синхронного микродвигателя дало:  $R = 39,81$  Ом и  $L_{эксп} = 7,757$  мГн.

В рассматриваемом двигателе обмотка имеет форму равнобедренного треугольника (рис.3).

Причем длина среднего контура  $l \approx 7,97$  см, площадь основания  $S \approx 2,21$  см<sup>2</sup>. По выражению (2) средний диаметр эквивалентной катушки  $d = 7,97/\pi \approx 2,54$  см, а радиальная толщина этой катушки  $r = 2,21/(\pi \cdot 2,54) \approx 0,28$  см (рис.2). Тогда

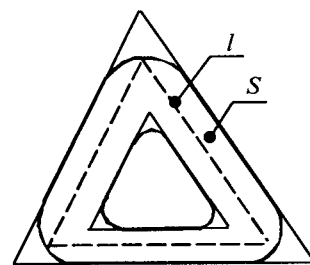


Рис.3. Эскиз обмотки статора двигателя

для необходимые коэффициенты для расчета собственной индуктивности катушки по формуле (1):  $\alpha = 0,5/2,54 = 0,20$ ,  $\rho = 0,28/2,54 = 0,11$ ,  $\gamma = 0,28/0,5 = 0,56$ , а  $K_{\alpha} = 0,32$ ,  $k = 0,05$  определены по таблицам [5]:

Собственная индуктивность обмотки фазы статора в соответствии с отношением (1):  $L_1 = (\pi/4)4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 330^2 (2,54 \cdot 10^{-2}/0,2)0,27 \approx 3,685 \cdot 10^{-3}$  Гн =  $3,685$  мГн.

Анализ типа соединения статорной обмотки (рис.1) позволяет сделать вывод о том, что статор рассматриваемого СД имеет четыре попарно соединенные катушки, а значит, две фазы. Следовательно,  $m = 2$ .

Тогда расчетное значение индуктивности фазы статора, состоящей из двух последовательно соединенных обмоток,

$$L_{расч} = 2(L_1 + M_{1J}), \quad (12)$$

где  $L_{расч} = 2(3,685 + 0,004) = 7,378$  мГн.

Отличие  $L_{\text{расч}}$  от  $L_{\text{эксп}}$  составляет  $\Delta L = (L_{\text{расч}} - L_{\text{эксп}})/L_{\text{расч}} = (7,378 - 7,757)/7,378 = -0,051$  или 5,1%.

Для рассматриваемого двигателя по соотношению (4) и с учетом конструктивных особенностей расположения обмоток (рис.1) взаимная индуктивность обмоток одной фазы  $M_{1j} = 0,004$  мГн и обмоток фаз двигателя  $M = 0,250$  мГн.

В процессе эксперимента было выявлено, что на некоторой частоте вращения ротора амплитуда ЭДС составляет  $E_{\text{ср}} = 8,467$  В при  $\omega = 138,8$  рад/с. В соответствии с соотношением (6) потокосцепление статора от постоянного магнита  $\Psi_{\text{п.м}} = 8,467/138,8 \approx 0,061$  Вб.

Постоянный магнит ротора исследуемого двигателя имеет восемь полюсов и, следовательно, число пар полюсов данного микродвигателя  $p = 4$ .

Момент инерции вала двигателя, можно определить из выражения (7), подставив значения массы и диаметры его отдельных элементов. Ротор рассматриваемого электродвигателя представляет собой рабочий вал с напрессованным на него диском, к которому приклеен кольцевой магнит (рис.4).

При вычислении моментов инерции ротора были использованы следующие данные:

масса диска ротора с ведущим валом двигателя  $M_{\text{диск.в}} = 150,65 \cdot 10^{-3}$  кг; масса магнита двигателя  $M_{\text{магн}} = 56,73 \cdot 10^{-3}$  кг.

Собственную массу диска можно определить по формуле:

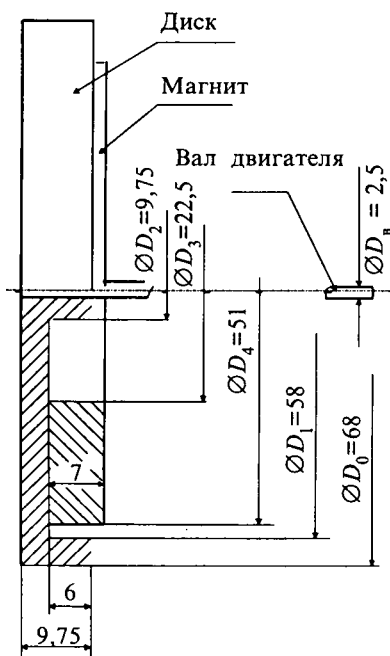


Рис.4. Ротор электродвигателя с осевым полем от постоянных магнитов

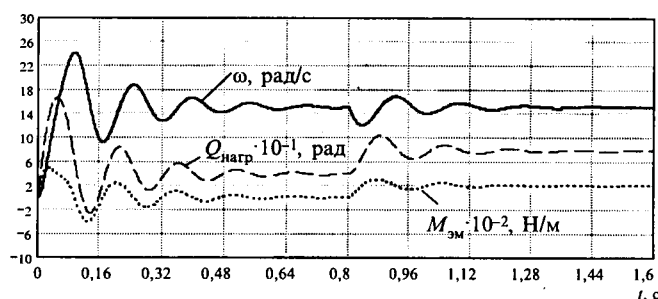


Рис.5. Переходные процессы электродвигателя с осевым полем от постоянных магнитов при пуске в холостую и набросе статического момента

$$M_{\text{диск.рот}} = M_{\text{диск.в}} - M_{\text{в}}. \quad (13)$$

Масса рабочего вала определена по соотношению (10).

Для рассматриваемого двигателя по приведенным формулам определен момент инерции:  $J = 1,247 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>.

Рассчитанные параметры ( $R=39,81$  Ом;  $L = 7,757$  мГн;  $M = 0,25$  мГн;  $\Psi_{\text{п.м}} = 0,061$  Вб;  $m = 2$ ;  $p = 4$ ;  $J = 1,247 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>) использованы для моделирования в программной среде MathCad переходных процессов в электроприводе с рассматриваемым двигателем. В частности, на рис.5 приведены результаты моделирования, полученные при пуске двигателя в холостую с последующим набросом статического момента ( $t = 0,8$  с) и представленные кривыми переходных процессов:  $Q_{\text{нагр}}$  – угол между векторами напряжения и потокосцепления статора, рад;  $M_{\text{эм}}$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м;  $\omega$  – угловая скорость вращения вала двигателя, рад/с.

Качественное сопоставление полученных расчетных переходных процессов по рис.5 с аналогичными исследованиями других авторов [7, 8] доказывает адекватность отражения имитационной модели электродвигателя с параметрами, рассчитанными по предложенной методике, реальным электромагнитным процессам в электрической машине. Сравнение же расчетных значений параметров с результатами экспериментальных исследований показало достаточную для инженерных расчетов сходимость (погрешность не превысила по различным переменным 2–5%) [3–5].

Таким образом, разработана методика определения параметров имитационной модели электродвигателя с осевым полем от постоянных магнитов, позволяющая реализовать преимущества и минимизировать недостатки расчетных и экспериментальных методик для случая, когда

известны геометрия и обмоточные данные (число витков, диаметр провода) статорных катушек, а также геометрия ротора.

#### Список литературы

1. Пикунов В.В., Митрофанов А.С. Математическое моделирование синхронного микродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов // Тезисы докладов научного семинара по электротехнике. Иваново: ИГЭУ, 2000. С. 16.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001.
3. Жемчугов Г.А. Уравнения синхронной машины с постоянными магнитами // Электротехника. 1975. № 1. С. 42–44.
4. Астахов Н.В., Лопухина Е.М., Медведев В.Т. и др. Испытание электрических микромашин: Учеб. пособие для электротехн. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1984.
5. Калантаров П.Н., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Фаворин М.В. Моменты инерции тел. М.: Машиностроение, 1970.
7. Consoli A., Abela A. Transient performance of permanent magnet AC motor drives. // IEEE Annual Meeting on IAS. 1984. P. 458–463.
8. Dietrich Naunin, Hans-Christian Reuss. Synchronous servodrives: A very compact solution of control problems by means of a single-chip-microcomputer // Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. 23 Annu. Meet; Pittsburgh, Pa Oct. 27, 1988. Pt 1 48. – New York, 1988. P. 266–271.

**Глазунов Виктор Фёдорович** – заведующий кафедрой "Электропривод и автоматизация промышленных установок" Ивановского государственного энергетического университета, проф. Окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института (ИЭИ) в 1968 г. Защитил докторскую диссертацию по теме "Анализ и совершенствование управления процессами транспортирования ткани в условиях интенсификации отделочного производства" в Костромском государственном технологическом университете в 1985 г.

**Пикунов Владимир Васильевич** – доцент кафедры "Электропривод и автоматизация промышленных установок" Ивановского государственного энергетического университета. Окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института (ИЭИ) в 1978 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Разработка и исследование асинхронного электропривода с векторным управлением электромагнитным моментом" в ИЭИ в 1987 г.

**Митрофанов Андрей Сергеевич** – аспирант кафедры "Электропривод и автоматизация промышленных установок" Ивановского государственного энергетического университета. Окончил электромеханический факультет Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ) в 2000 г.

## Об особенностях использования цепных дробей для аналитического упрощения передаточных функций электромеханических систем

АКИМОВ Л.В., ДОЛБНЯ В.Т.

*С помощью цепных дробей обоснована возможность аппроксимации более низким порядком минимально- и неминимально-фазовых передаточных функций сложных электромеханических объектов. Это способствует простоте решения задач синтеза их регуляторов.*

*Chain fractions have proved to provide a possibility of lower-order approximation of minimum- and nonminimum-phase transfer functions of complex electromechanical systems. It results in simplifying solutions to system regulator synthesis problems.*

При изучении динамических особенностей сложных электромеханических систем целесообразно в тех случаях, когда это возможно, прибегнуть к упрощению их передаточных функций. Последние, как правило, имеют высокий порядок, что представляет определенные трудности при аналитических исследованиях.

Одним из способов понижения порядка передаточной функции является ее разложение в цепную дробь. Цепные дроби издавна успешно применяются для упрощения дробно-рациональных функций, представленных в виде отношения полиномов с числовыми коэффициентами [1]. Однако попыток использования их для упрощения

функций, выраженных в общем символьном виде, до последнего времени не встречалось. Впервые такая возможность была высказана применительно к упрощению электрических схем и их передаточных функций в [2] и затем неоднократно использовалась в последующих работах авторов настоящей публикации [3–5].

Упрощение аналитических функций с использованием цепных дробей довольно трудоемкая операция, которая хотя и приводит к снижению порядка функции до желаемой степени, но дает ответ в довольно громоздком виде [3]. В то же время, располагая реальными значениями параметров, входящих в исследуемую систему, мож-

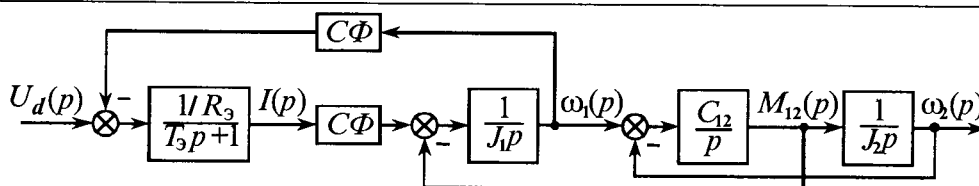


Рис.1

но продолжить упрощение и прийти к довольно простым аналитическим зависимостям без ущерба для качества приближения.

Покажем возможности таких аналитических приближений при помощи цепных дробей на конкретных практических примерах.

Рассмотрим вначале две передаточные функции широко известной двухмассовой электромеханической системы, изображенной с общепринятыми обозначениями на рис.1,

$$W_1(p) = \frac{\omega_2(p)}{U_d(p)} = \frac{(C\Phi)G_3 C_{12}}{J_1 J_2 T_3} \times \frac{1}{p^4 + \frac{1}{T_3} p^3 + \frac{(J_1 + J_2) C_{12} T_3 + (C\Phi)^2 G_3 J_2}{J_1 J_2 T_3} p^2 + \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2 T_3} p + \frac{(C\Phi)^2 G_3 C_{12}}{J_1 J_2 T_3}}; \quad (1)$$

$$W_2(p) = \frac{\omega_1(p)}{U_d(p)} = \frac{(C\Phi)G_3}{J_1 T_3} \times \frac{p^2 + \frac{C_{12}}{J_2}}{p^4 + \frac{1}{T_3} p^3 + \frac{(J_1 + J_2) C_{12} T_3 + (C\Phi)^2 G_3 J_2}{J_1 J_2 T_3} p^2 + \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2 T_3} p + \frac{(C\Phi)^2 G_3 C_{12}}{J_1 J_2 T_3}}. \quad (2)$$

Примем следующие значения параметров структурной схемы:  $T_3 = 0,009$  с;  $J_1 = 0,018$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_2 = 0,021$  кг·м<sup>2</sup>;  $(C\Phi) = 1,21$  В·с;  $C_{12} = 72,6$  Н·м/рад;  $G_3 = 0,229$  Сим. При этом передаточные функции выражаются такими числовыми зависимостями:

$$W_1(p) = 5,91 \cdot 10^6 \times \frac{1}{p^4 + 111p^3 + 9560p^2 + 832275p + 7,15 \cdot 10^6}; \quad (3)$$

$$W_2(p) = 1710 \times \frac{p^2 + 3457}{p^4 + 111p^3 + 9560p^2 + 832275p + 7,15 \cdot 10^6}. \quad (4)$$

Полюсы обеих функций  $p_{1,2} = -3,45 \pm j89$ ;  $p_3 = -9,6$ ;  $p_4 = -94,4$ .

Поставленная цель заключается в упрощении аналитических выражений (1) и (2) таким образом, чтобы приближенные передаточные функции  $W_1^*(p)$  и  $W_2^*(p)$  имели бы порядок не выше второго, но вместе с тем мало отличались от исходных.

В [6] даны расчетные формулы для разложения в цепную дробь передаточных функций, выражающихся в общем виде рациональной дробью

$$W(p) = K \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}, \quad m \leq n. \quad (5)$$

При разложении таких функций по обратным степеням оператора  $p$  цепная дробь имеет вид:

$$W(p) = K \frac{1}{\frac{a_0}{b_0} + \frac{1}{\frac{b_0}{c_1 p} + \frac{1}{\frac{c_1}{d_1} + \frac{1}{\frac{d_1}{f_2 p} + \frac{1}{\frac{f_2}{g_2} + \frac{1}{\frac{g_2}{h_3 p} + \dots}}}}}}, \quad (6)$$

где  $c_i = a_i - \frac{a_0}{b_0} b_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ ;  $d_i = b_i - \frac{b_0}{c_1} c_{i+1}$ ,

$1 \leq i \leq n-1$ ;  $f_i = c_i - \frac{c_1}{d_1} d_i$ ,  $2 \leq i \leq n$ .

Так как целесообразно приводить упрощенную функцию к порядку не выше второго, иначе аналитическое определение полюсов практически не представляется возможным, ограничимся первыми четырьмя элементами цепной дроби. Тогда после свертывания (6) получим упрощенную передаточную функцию второго порядка в виде

$$W^*(p) = \frac{b_0(b_0 f_2 + c_1 d_1)p + b_0^2 c_1}{b_0 c_1 f_2 p^2 + (a_0 b_0 f_2 + a_0 c_1 d_1 + b_0 c_1^2)p + a_0 b_0 c_1}, \quad (7)$$

где коэффициенты  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $c_1$ ,  $d_1$  и  $f_2$  определяются из (5) и (6).

Для примера рассмотрим функцию  $W_1(p)$ . Из  $A(\omega)$  (1) получим:

$$a_0 = \frac{(C\Phi)^2 G_3 C_{12}}{J_1 J_2 T_3} = 7,15 \cdot 10^6 \text{ 1/c}^4;$$

$$a_1 = \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2 T_3} = 832275 \text{ 1/c}^3;$$

$$a_2 = \frac{(J_1 + J_2) C_{12} T_3 + (C\Phi)^2 G_3 J_2}{J_1 J_2 T_3} = 9560 \text{ 1/c}^2;$$

$$a_3 = \frac{1}{T_3} = 111 \text{ 1/c}; \quad a_4 = 1; \quad b_0 = 1.$$

Здесь приведены также числовые значения этих коэффициентов.

Поскольку находится приближенное выражение, то целесообразно вносить упрощения и при промежуточных выкладках, основываясь на реальных числовых значениях параметров элементов структурной схемы. Так, выражение для  $a_2$  без особой погрешности может быть сведено к виду

$$a_2 = \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2} = 7490 \text{ 1/c}^2.$$

Вносимая при этом погрешность составляет 20%, что вполне допустимо с учетом требований к приближенной функции.

Далее по формулам (6) определяем:

$$c_1 = a_1 = \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2 T_3};$$

$$c_2 = a_2 = \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2}; \quad c_3 = a_3 = \frac{1}{T_3};$$

$$d_1 = -\frac{a_2}{a_1} = -T_3; \quad d_2 = -\frac{a_3}{a_1} = -\frac{J_1 J_2}{(J_1 + J_2) C_{12}};$$

$$f_2 = a_2 = \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2}.$$

Используя выражение (7), получим:

$$W_1^*(p) = \frac{\frac{(C\Phi)G_3}{T_3(J_1 + J_2)}}{p^2 + \frac{1}{T_3}p + \frac{(C\Phi)^2 G_3}{(J_1 + J_2)T_3}} \quad (8)$$

или, при подстановке численных значений параметров,

$$W_1^*(p) = \frac{789}{p^2 + 111p + 955}.$$

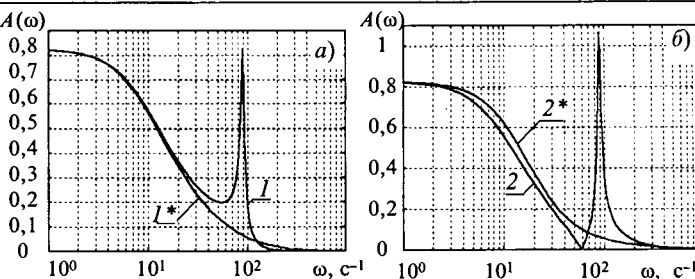


Рис.2

Полюсы упрощенной функции  $p_1 = -9,5$ ,  $p_2 = -101,5$ . Сравнивая их с полюсами исходной функции (4), замечаем, что они почти полностью совпали с  $p_3$  и  $p_4$ .

На рис.2,а приведены амплитудно-частотные характеристики  $W_1(\omega)$  и  $W_1^*(\omega)$ . Их анализ показывает, что кривые исходной и упрощенной функций практически совпадают за исключением того, что при упрощении выпал резонансный пик в исходной функции при  $\omega = 89 \text{ c}^{-1}$ , равный  $0,825 \text{ 1/(В·с)}$ . Это объясняется выпадением двух ее комплексных полюсов  $p_{1,2}$ .

Амплитудно-частотные характеристики, конечно, отражают свойства системы, но не дают представления о характере переходного процесса. Судить о нем можно лишь по переходной характеристике. Можно утверждать, что взаимно-однозначное соответствие между этими двумя характеристиками в аналитическом виде если и существует, то в общем случае не поддается определению. Такое соответствие выявлено лишь для систем 2- и 3-го порядков [7].

Известно, что построение переходной характеристики требует определения полюсов системы, тогда как построение амплитудно-частотной характеристики выполняется без этого. Если бы взаимно-однозначное аналитическое соответствие между обеими характеристиками системы высокого порядка обнаружилось, это означало бы, что любое уравнение высокого порядка было бы разрешимо в радикалах, чего на самом деле быть не может для уравнений порядка выше четвертого. Поэтому есть смысл рассмотреть, кроме амплитудно-частотных характеристик, также и переходные. Они приведены на рис.3,а, который более убедительно подтверждает правомочность замены передаточной функции (1) более простым выражением (8).

Возвратимся к передаточной функции  $W_2(p)$  (2). Значения коэффициентов  $a_i$  здесь те же, что и у функции  $W_1(p)$ , но для числителя

$$b_0 = \frac{C_{12}}{J_2} = 3457 \text{ 1/c}^2; \quad b_1 = 0; \quad b_2 = 1.$$

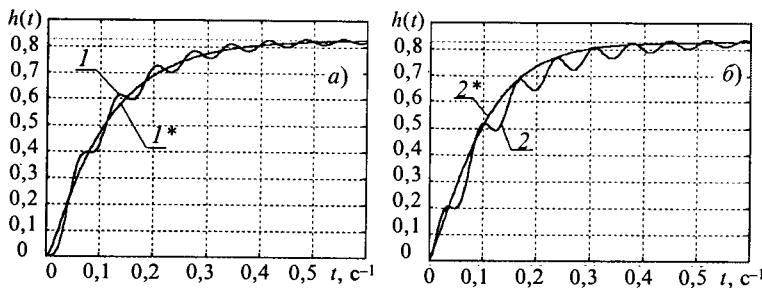


Рис.3

На основании соотношений (6):

$$c_1 = a_1 = \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2 T_3}; \quad c_2 = a_2 - \frac{a_0}{b_0} = \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2};$$

$$c_3 = a_3 = \frac{1}{T_3}; \quad d_1 = \frac{a_0}{a_1} - \frac{b_0 a_2}{a_1} = -\frac{T_3 C_{12}}{J_2};$$

$$d_2 = 1 - \frac{b_0}{a_1} a_3 = \frac{J_2}{J_1 + J_2};$$

$$f_2 = a_2 - \frac{a_0}{b_0} - a_1 \frac{d_2}{d_1} = \frac{(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2} + \frac{J_2}{J_1 T_3^2}.$$

При подстановке численных значений параметров можно заметить, что второе слагаемое в  $f_2$  равно удвоенному первому слагаемому с незначительной погрешностью, а именно  $7490 + 14403$ . Поэтому приближенно

$$f_2 = \frac{3(J_1 + J_2) C_{12}}{J_1 J_2}.$$

Возможно упростить и коэффициент при  $p$  в знаменателе выражения (7), сохранив лишь последнее слагаемое из трех. Это внесет погрешность, не превышающую 13%. В результате в общем виде

$$W_2^*(p) = \frac{(C\Phi) G_3}{J_1 T_3} \frac{b_0}{f_2 p^2 + c_1 p + a_0} = \frac{2(C\Phi) G_3}{3(J_1 + J_2)} \left( p + \frac{1}{2T_3} \right) = \frac{p^2 + \frac{1}{3T_3} p + \frac{(C\Phi)^2 G_3}{3(J_1 + J_2) T_3}}{p^2 + \frac{1}{3T_3} p + \frac{(C\Phi)^2 G_3}{3(J_1 + J_2) T_3}}. \quad (9)$$

$$W_3(p) = \frac{U_{o.c}(p)}{U_{PC}(p)} = \frac{(C\Phi) K_{ДС}}{K_{ДТ} |\beta_c|} \left( \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_c|}{C_{12}} p + 1 \right) = \frac{(2T_\mu p + 1) \left( \frac{T_c}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1) \Omega_{12}^2} p^2 + T_c p - 1 \right)}{p^2 + \frac{1}{3T_3} p + \frac{(C\Phi)^2 G_3}{3(J_1 + J_2) T_3}}. \quad (10)$$

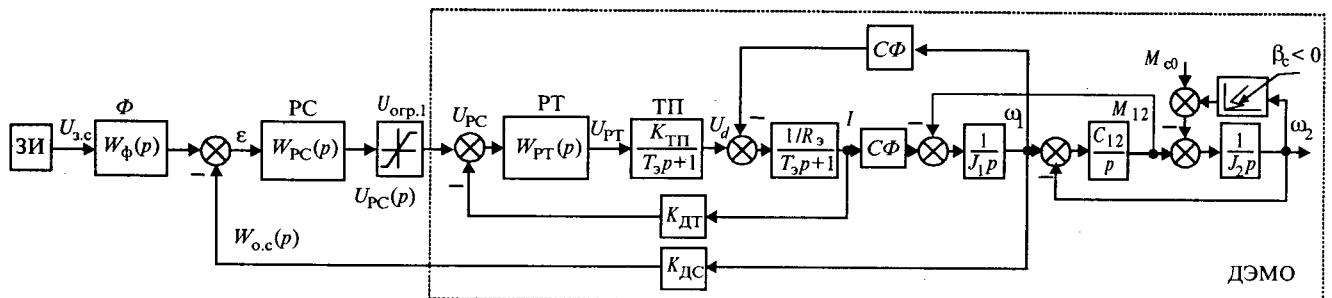


Рис.4

При подстановке в (9) численных значений параметров приходим к выражению

$$W_2^*(p) = \frac{4,74(p + 55,6)}{p^2 + 37p + 319}$$

с полюсами  $p_1 = -23,3$ ,  $p_2 = -13,7$ .

Несмотря на неполное совпадение полюсов, амплитудно-частотные и переходные характеристики совпадают вполне удовлетворительно (см. рис.2,б и рис.3,б). В кривой для исходной функции на рис.2,б два экстремума, что объясняется не только наличием пары комплексных полюсов, но и уменьшением числителя до нуля при частоте  $\omega = \sqrt{C_{12}/J_2} = 58,8 \text{ с}^{-1}$ . За исключением этих экстремумов в остальном амплитудно-частотные характеристики близко совпадают. Неплохое совпадение и у переходных характеристик, показанных на рис.3,б.

Универсальность упрощения передаточных функций с помощью цепных дробей подтверждается также возможностью их применения и в случае, когда система включает неминимально-фазовые, в том числе и неустойчивые звенья.

Покажем это на примере системы подчиненного регулирования рис.4, где внутренний контур тока традиционно настроен на модульный оптимум.

Известно, что при наличии нелинейной нагрузки, зависящей от скорости механизма, двух-массовый электромеханический объект (ДЭМО) при работе электропривода на ее падающем участке с жесткостью  $\beta_c < 0$  описывается неминимально-фазовой передаточной функцией вида [8]



где  $\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}$ ;  $\Omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12}\gamma}{J_2}}$ ;  $T_c = \frac{J_1 + J_2}{|\beta_c|}$ .

Допустим, что параметрами данного электропривода являются:  $K_{ТП} = 51,3$ ;  $T_\mu = 0,004$  с;  $(C\Phi) = 2,68$  В·с;  $R_3 = 0,087$  Ом;  $L_3 = 6,873 \cdot 10^{-3}$  Гн;  $T_3 = 0,079$  с;  $C_{12} = 5 \cdot 10^3$  Н·м/рад;  $J_1 = 10$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_2 = 10$  кг·м<sup>2</sup>;  $\gamma = 2$ ;  $\Omega_{12} = 31,6$  с<sup>-1</sup>;  $\beta_c = -100$  Н·м·с;  $T_c = 0,2$  с;  $K_{дт} = 0,005$  В/А;  $K_{дс} = 0,0637$  В·с. При этом нулями  $\lambda_i$  и полюсами  $p_i$  передаточной функции (10) будут:  $\lambda_{1,2} = 5 \pm j21,8$ ;  $p_1 = 5,13$ ;  $p_{2,3} = 2,435 \pm j31,6$ ;  $p_4 = -125$ .

Используя формулы (6) для определения элементов цепной дроби, найдено достаточно простое выражение передаточной функции (10)

$$W_3^*(p) = \frac{(C\Phi)K_{дс}}{K_{дт}|\beta_c|T_c} \left( p + \frac{2|\beta_c|}{J_2} \right) = \frac{(C\Phi)K_{дс}}{K_{дт}|\beta_c|T_c} \left( p + \frac{2|\beta_c|}{J_2} \right) \cdot (11)$$

$$= \frac{(C\Phi)K_{дс}}{K_{дт}|\beta_c|T_c} \left( p + \frac{2|\beta_c|}{J_2} \right) \left( p^2 + \frac{2J_1 + J_2}{J_2(J_1 + J_2)} p - \frac{2\beta_c^2}{J_2(J_1 + J_2)} \right)$$

Важно отметить, что передаточная функция  $W_3^*(p)$  по-прежнему относится к группе неминимально-фазовых, т.е. сохраняет основное свойство функции  $W_3(p)$ . Кроме того, она обладает удивительным свойством, заключающимся в том, что полином ее знаменателя аналитически раскладывается на два сомножителя вида

$$p^2 + \frac{2J_1 + J_2}{J_2(J_1 + J_2)} p - \frac{2\beta_c^2}{J_2(J_1 + J_2)} = \left( p + \frac{2|\beta_c|}{J_2} \right) \left( p - \frac{|\beta_c|}{J_1 + J_2} \right),$$

один из которых полностью соответствует полиному числителя. Это обосновывает возможность аппроксимировать исходную неминимально-

но-фазовую передаточную функцию (10) видом

$$W_3^*(p) = \frac{(C\Phi)K_{дс}}{(2T_\mu p + 1)(T_c p - 1)} \cdot (12)$$

При заданных параметрах электропривода для нуля и полюсов передаточной функции (11) имеем:  $\lambda_1 = -20$ ;  $p_1 = 5$ ;  $p_2 = -20$ ;  $p_3 = -125$ , откуда для аппроксимирующей функции (12) найдено  $p_1 = 5$ ,  $p_2 = -125$ . Можно видеть, что в результате аппроксимации с помощью цепных дробей доминирующий положительный корень  $p = 5,13$  практически не изменился. Его отклонение не превышает 2,6%. Это убеждает в том, что найденная передаточная функция ДЭМО (12) может быть положена в основу синтеза регулятора скорости, например, полиномиальным методом, способствуя существенному упрощению его передаточной функции.

На рис.5 показаны амплитудно-частотные  $A(\omega)$  и переходные  $h(t)$  характеристики, отвечающие передаточным функциям  $W_3(p)$  и  $W_3^*(p)$  без сомножителя  $1/(2T_\mu p + 1)$ . Как и в случае минимально-фазовых передаточных функций, данные характеристики мало чем отличаются друг от друга в области частот  $\omega < \Omega_{12}$ .

## Выводы

1. Обоснована универсальность и целесообразность использования цепных дробей для аппроксимации более низким порядком минимально- и неминимально-фазовых передаточных функций сложных электромеханических систем без потери их основных свойств, связанных с устойчивостью и характером переходных процессов.

2. Найденные аппроксимирующие выражения передаточных функций двухмассовых электромеханических систем способствует не только облегчению решения задач синтеза регуляторов скорости, но и упрощению их передаточных функций, подлежащих аппаратурной реализации.

## Список литературы

1. Chen C.F., L.S. Shien. A novel approach to linear model simplification//Int.J.Control. 1968. Vol.8, № 6.
2. Долбня В.Т. Топологический синтез и упрощение сложных схем высокого порядка с использованием цепных дробей //Электротехника. 1999. № 5. С.6–12.

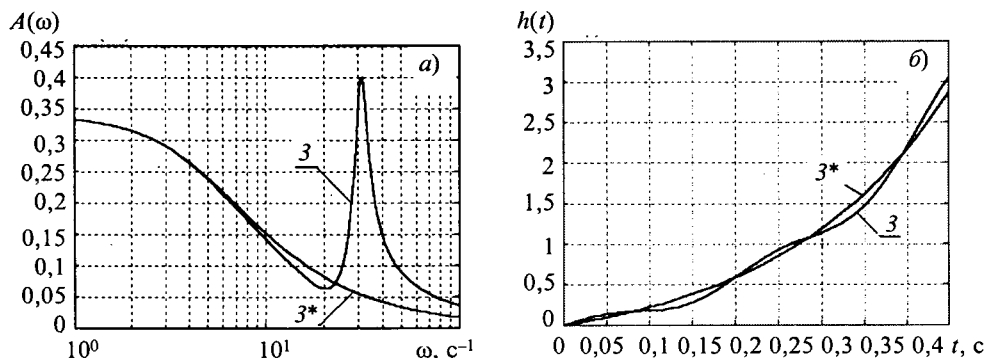


Рис.5

3. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Клепиков В.Б., Пирожок А.В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой. Харьков: НТУ "ХПИ", Запорожье: ЗНТУ. 2002.

4. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Пирожок А.В. Оценка точности работы двухмассовых электроприводов с нелинейной реактивной нагрузкой //Техническая электродинамика. Силовая электроника и энергоэффективность. 2002. С.41–46.

5. Акимов Л.В., Воинов В.В., Долбня В.Т., Пирожок А.В. Синтез полиномиальным методом с использованием цепных дробей регулятора скорости для исходно-неустойчивого ДЭМО с электроприводом ТПН-АД //Электротехника. 2003. № 3. С.20–25.

6. Долбня В.Т. Расчетные формулы для разложения в цепную дробь передаточных функций различного вида // Вестник НТУ "ХПИ". Электротехника, электроника и электропривод". 2001. Вып.10. С.49–51.

7. Долбня В.Т., Миланич Т.В. Получение упрощенных передаточных функций сложных систем по их переходным характеристикам //Вестник НТУ "ХПИ". Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 2002. Вып.12, т. I. С.33–36.

8. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Динамика

двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния. Харьков: ХГПУ, 2000.

**Акимов Леонид Владимирович** – профессор кафедры "Автоматизированные электромеханические системы" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" (НТУ "ХПИ"). Окончил электромашиностроительный факультет ХПИ в 1961 г. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Теория, алгоритмизация проектирования и создание оптимальных по быстродействию электроприводов при ограничениях координат и идеализированном управлении" в МЭИ.

**Долбня Виктор Тимофеевич** – профессор кафедры "Автоматизированные электромеханические системы" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" (НТУ "ХПИ"). Окончил электромашиностроительный факультет ХПИ в 1955 г. В 1979 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Исследования устройств преобразовательной техники топологическим методом" в Институте электродинамики АН Украины.

## **Использование искусственных нейронных сетей для диагностики неисправности асинхронного электропривода в режиме реального времени<sup>1</sup>**

**ШЕТАТ Б., ХОДЖА ДЖ.**

*Рассматриваются системы диагностирования регулируемых асинхронных электроприводов на основе применения нейронных сетей, объединенных в систему принятия решений по идентификации различных дефектов и определению последовательности их диагностирования. Одновременно решаются задачи оптимизации числа фиксируемых переменных диагностируемого объекта, позволяющих при внешних возмущающих воздействиях выделить дефекты с достаточной степенью достоверности.*

Эффективность функционирования промышленных электроустановок связана с созданием систем диагностики, способных выделять и определять места появления дефектов, возникающих в различных частях электрооборудования. Актуальность этих систем предопределена сложностью решения большинства задач диагностики и устранения повреждений электрооборудования, вызывающих снижение производительности и уменьшение объема выпускаемой продукции.

Как правило, при эксплуатации асинхронных электроприводов наибольшее внимание обращалось на дефекты, связанные с возникновением перенапряжений и КЗ в силовых цепях непосредственно двигателей, а также их замыканий на землю. Однако современные регулируемые асинхронные электроприводы, содержащие и преоб-

разовательные устройства, требуют большей глубины диагностирования и, соответственно, расширения возможностей систем диагностирования дефектов.

При диагностировании асинхронных двигателей принято рассматривать следующие их дефекты [1, 2]:

- обрыв или КЗ в цепях одной или нескольких фаз обмоток статора;
- ошибочное соединение обмоток статора;
- обрыв или КЗ в цепях обмоток ротора;
- механические повреждения вала двигателя, включая перекося оси ротора в подшипниках и в итоге возникновение неравномерности воздушного зазора между ротором и статором и появление случайных касаний ротора и статора;
- дефекты подшипников;

При диагностировании регулируемого электропривода следует учитывать появление дефектов и в преобразовательных устройствах, а так-

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

же в элементах систем управления электроприводом, в частности:

- дефекты силовых полупроводниковых ключей (транзисторов, тиристоров);
- дефекты датчика скорости;
- дефекты элементов систем управления.

Принято [3,4], что технические системы диагностики делятся на 2 категории. В первой диагностирование осуществляется в текущем времени путем сравнения поведения переменных реального объекта и его математической модели при наличии заранее известного детерминированного соответствия между ними. Во второй используются элементы искусственного интеллекта, среди которых наиболее развиты системы распознавания форм, экспертные системы и сеть искусственных нейронов.

Во второй категории систем диагностирования основной задачей является составление каталога отказов-симптомов универсальных аппроксиматоров (сети нейронов)[1,2,4–6]. Следует отметить, что искусственная нейронная сеть (ИНС) обладает характеристиками, позволяющими автономно решать проблемы классификации переменных объекта и их форм, а также самообучения алгоритмам диагностирования, исходя из опытов отказов. ИНС позволяет разработать непараметрическую модель, которая может воспроизвести любое исправное и неисправное состояние электропривода и, более того, аппроксимировать свою идентификацию на другие примеры, которые не были изучены. Такая модель способна запоминать примеры событий, распределяя на их основании веса соединений структуры, вплоть до устранения нейронов или соединений, которые не влияют на запоминание примеров.

**Структура автоматической системы диагностирования неисправностей**

Архитектура системы диагностирования неисправностей электромеханических устройств представляет собой 2 подсистемы: подсистему приема и обработки информации и подсистему интерпретации полученной информа-

ции о состоянии объекта диагностирования. Первая осуществляет прием данных по состоянию объекта и их последующую обработку (распределение данных, оценку переменных и их отображение). Вторая подсистема производит распознавание с помощью ИНС неисправностей электромеханической системы и дает рекомендации по реализации дальнейших ее действий (рис.1) [7].

Применение при диагностировании большого числа контролируемых переменных электропривода (например, напряжений и токов обмоток статора электродвигателя, частоты вращения) позволяет увеличить достоверность диагностирования и сделать ее более эффективной.

Для реализации модуля ИНС предварительно определяются размеры нейронной сети, т.е. число ее входов и выходов. Затем архитектура сети формируется исходя из алгоритма обучения и минимизации среднеквадратической ошибки результатов диагностирования.

#### Модуль интерпретации информации

Прежде, чем встроить блок ИНС в подсистему интерпретации информации, изучаются три нейронных сети со входами разной архитектуры. Входы трех сетей не одного и того же размера, а следовательно, и их структуры, выбранные после фазы обучения, будут отличаться (иметь разное число внутренних слоев и число нейронов в этих слоях).

В результате выбора наиболее целесообразной сети диагностирования асинхронного электропривода на основе объемного параметрического исследования трёх нейронных сетей принимаются 4 принципиальных решения.

**Выбор диагностируемых переменных.** Выбра-

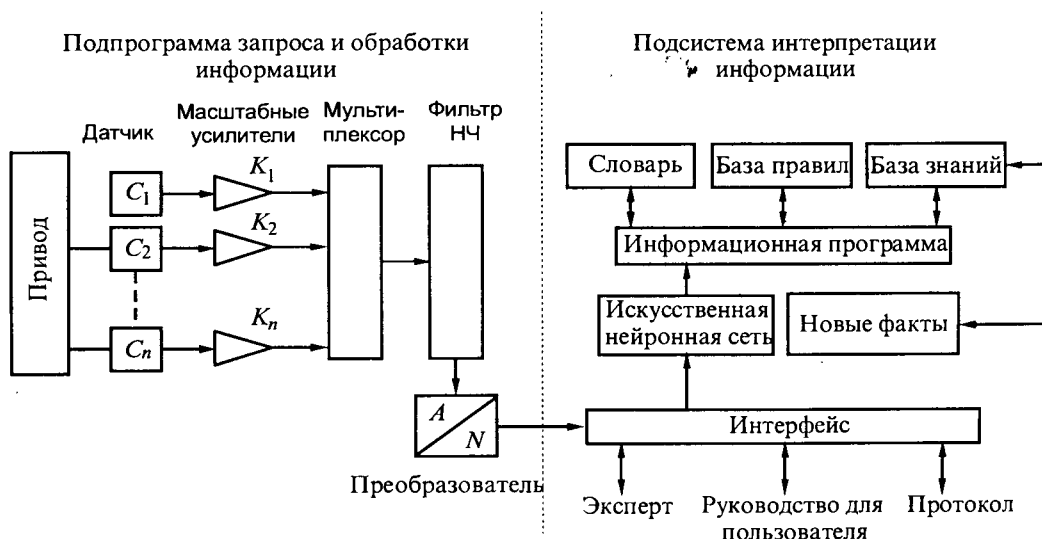


Рис.1. Предлагаемая архитектура автоматической системы диагностирования

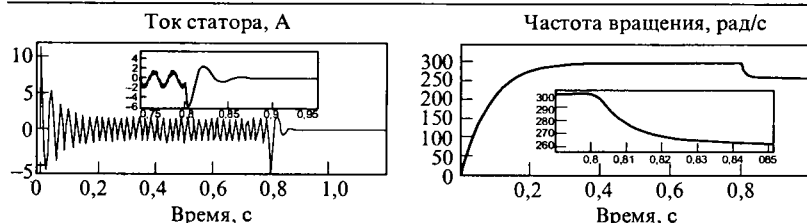


Рис.2. Обрыв трёх фаз питания ПЧ

ны следующие переменные: ток статора, частота вращения, управляющее напряжение. Это обусловлено тем, что именно эти переменные в наибольшей мере характеризуют неисправность асинхронного электропривода за счет резкого изменения их абсолютных значений при возникающих дефектах. К тому же эти переменные доступны прямому и непосредственному их измерению техническими средствами [4,6]. На рис.2 даны фрагменты изменения тока статора и частоты вращения асинхронного двигателя в первые моменты времени при обрыве трёхфазных силовых цепей питания преобразователя частоты (ПЧ), на выход которого был подключен двигатель.

**Конструкция базы данных.** Для создания на базе ИНС модели, описывающей исправное и неисправное состояния электромеханической системы, необходимо было создать такую базу данных, в которой содержалась бы достаточная информация о возможных дефектах, возникающих в различных режимах работы электропривода [1, 4, 8–11]. С этой целью были смоделированы возможные неисправности электропривода при различных режимах работы двигателя (оценивались 12 видов неисправностей, включая исправное состояние) и для каждого состояния оценивались изменения текущих значений трёх выбранных ранее переменных в течение периода изменения тока статора. В итоге база данных каждой переменной составила 3000 разных значений (векторов), характеризующих возможные режимы работы электропривода. Это число, соответствующее числу результатов и необходимо сообщить нейронной сети (табл.1).

**Создание блока ИНС.** Нейронные сети, которые определились, являются сетями многоуровневыми с оптимальным алгоритмом своего обучения [4–6, 12].

Для встраивания блока ИНС в

Таблица 1

| Тип неисправности               | Символ | Код         |
|---------------------------------|--------|-------------|
| Обрыв одной фазы                | CM     | 00000000001 |
| Обрыв 2-х фаз                   | CB     | 00000000010 |
| Обрыв 3-х фаз                   | CT     | 00000000100 |
| Несимметрия в одной фазе        | DM     | 00000001000 |
| Несимметрия в 2-х фазах         | DB     | 00000010000 |
| Несимметрия в 3-х фазах         | DT     | 00000100000 |
| Выход из строя преобразователя  | RB     | 00001000000 |
| Дефект транзистора              | MC     | 00010000000 |
| Межфазное короткое замыкание    | CC     | 00100000000 |
| Выход из строя счетчика         | OC     | 01000000000 |
| Выход из строя датчика скорости | DC     | 10000000000 |

систему диагностирования асинхронного электропривода предлагается исследовать 3 нейронные сети. После фазы их тестирования и сравнения между собой, выбирают нейронную сеть, наиболее подходящую для решения задач диагностирования. При этом этапы конструирования и пригодности нейронных сетей разделяются на 3 фазы (рис.3). Первая связана с выбором входов сетей и конструкцией базы данных исходя из файлов, полученных при анализе вы-

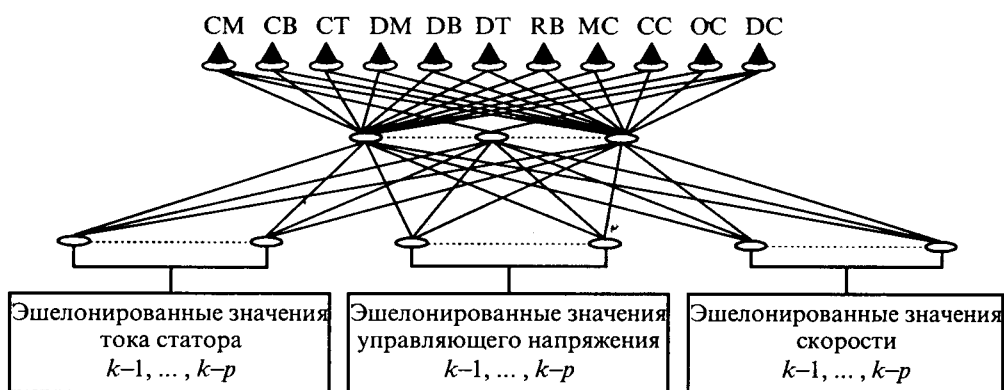


Рис.3. Структура третьей сети

Таблица 2

| № сети | Число нейронов |                 |               |                           |
|--------|----------------|-----------------|---------------|---------------------------|
|        | Входной слой   | Внутренний слой | Выходной слой | Среднеквадратичная ошибка |
| ИНС 1  | 10             | 13              | 11            | $3,24221 \cdot 10^{-15}$  |
| ИНС 2  | 20             | 8               | 11            | $3,71314 \cdot 10^{-16}$  |
| ИНС 3  | 30             | 6               | 11            | $3,2658 \cdot 10^{-17}$   |

шеупомянутых трех параметров диагностирования электропривода. Вторая связана с выбором выходов сетей (для каждой сети отдельно) и их кодов, третья – с выбором архитектуры сетей.

**Определение тестов селекционированных сетей.** При числе используемых входов блока ИНС, равном десяти (на рис.3  $p = 10$ ) для каждой контролируемой переменной в табл.2 приведены полученные результаты тестирования по [5].

Для 3 сетей этап селекционирования выполняется после того, как вторая сеть завершает свое тестирование после 148 презентаций каждого примера. При этом тестирование выполняется в 2 этапа: на первом сеть делает 100 повторяющихся исследований для каждого примера неисправности объекта диагностирования; на втором этапе они снова вводятся в программу тестирования, которая прекращается после 48 итераций с среднеквадратичной ошибкой результатов тестирования, равной  $3,7 \cdot 10^{-16}$  (рис.4).

**Тесты сетей нейронов**

Как только три сети нейронов будут построены и их обучение достигнет желаемых точностных показателей, переходят к этапу их сравнения между собой, тестируя входы и выходы каждой сети. Этот этап связан с фазой обучения и определением базы тестов, с помощью которых приступают к тестированию способностей сети распознавать дефекты, ранее не рассматриваемые при оценке работоспособности объекта диагностирования. Последняя операция позволяет оценить способность нейронной сети к обобщению результатов диагностирования.

Примеры трёх сетей нейронов (рис.3) и их тесты для ранее приведенных дефектов (табл.1) позволили идентифицировать их с большой точностью, что подтверждается значениями среднеквадратичных ошибок результатов диагностирования, близких к нулю (табл.2).

При тестировании третьей сети для примеров

Таблица 3

| Выходы<br>ИНС | Нагрузка, % номинальной |        |        |        |        |        |
|---------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               | 90%                     | 80%    | 60%    | 40%    | 20%    | 10%    |
| 1             | 1,0000                  | 1,0000 | 1,0000 | 0,8570 | 1,0000 | 0,9605 |
| 2             | 0,0000                  | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0005 |
| 3             | 0,0000                  | 0,0000 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0034 |
| 4             | 0,0049                  | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5             | 0,0000                  | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6             | 0,0000                  | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7             | 0,0000                  | 0,0000 | 0,0000 | 0,0057 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8             | 0,2310                  | 0,0000 | 0,0067 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9             | 0,0000                  | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 10            | 0,0000                  | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 11            | 0,0000                  | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

дефектов электропривода, которые не были изучены на фазе обучения сети, результаты ее моделирования для неисправности, связанной с обрывом цепи одной фазы источника питания ПЧ, представлены в табл.3.

Здесь представлены выходы третьей сети при различных относительных нагрузках электродвигателя. Первая строчка табл.3 соответствует дефекту, рассмотренному в данной тестовой фазе, т.е. при обрыве цепи одной фазы питания ПЧ. Данный дефект был распознан почти на 100% для большинства режимов работы электропривода (табл.3). Для других режимов работы результаты тестирования переменных заметно не отличались (например, минимальное значение результатов тестирования, соответствующих рассматриваемому дефекту равнялось 0,857, что близко проявлению того же дефекта в режиме 40% номинальной нагрузки электродвигателя).

Согласно анализу результатов, полученных на фазе теста всех трёх сетей, выявлено, что третья сеть наиболее производительна и, следовательно, именно она наиболее целесообразна для

применения в системах диагностирования. Что же касается выходов третьей сети, которые близки к желаемому значению, они должны быть приближены к "0" или к "1", чтобы обеспечить достоверность идентификации неисправности с указанием причины и места его по-

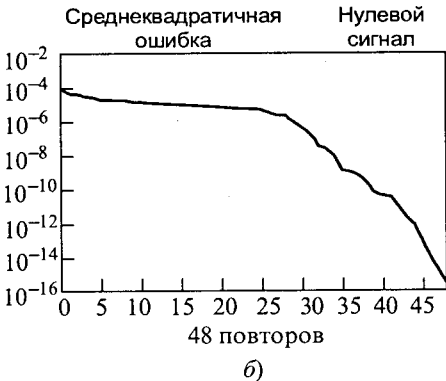
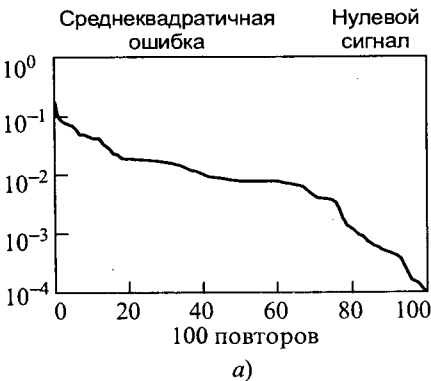


Рис.4. Эволюция среднеквадратичной ошибки для ИНС

явления и, как результат, обосновать рекомендации для устранения неисправности.

### Выводы

1. Показана возможность и эффективность применения нейронных сетей при диагностировании ряда неисправностей регулируемого асинхронного электропривода. Сеть, которая использует в качестве входов текущие значения трёх переменных асинхронного электропривода (напряжение, ток и частоту вращения двигателя), дает возможность с большой степенью достоверности выделить приведенные в табл.1 неисправности.

2. Выделение всего перечня возможных дефектов асинхронного электропривода потребует увеличения контролируемых переменных и обработки не только их текущих значений, но и спектрального состава переменных, фазовых сдвигов между ними и т.п. Применение нейронных сетей для их диагностирования в этом случае будет несомненно оправдано, поскольку позволит за счёт экспертных оценок сетей расширить класс диагностируемых дефектов и увеличить достоверность результатов диагностирования.

### Список литературы

1. Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C. Neural Networks approach to electric machine on-line diagnostics // ENE BRIGHTON, 13-16/9/91.
2. Nandi S., Tolyat H.A. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines A review // Industry applications conference, thirtyfourth IAS annual meeting conference record of the 1999. IEEE. Vol. 1. P. 197–202.
3. Zwingelsten G. Diagnostic des defaillances, theorie et pratique pour les systemes industriels. Paris: Ed Hermes, 1995.
4. Sorsa T., Koivo H.N., Koivisto H. Neural networks in process fault diagnosis // IEEE. Trans on system. 1991. Vol.21, № 4. P.7–8.

5. Napolitano M.R., Cadolph V., Neppach C., Naylor S. M-Innocenti and G Silvestri; "on learning neural architectures and cross-correlation analysis for actuator detection and identification", INJ.J control, 1996, Vol. g3, n° 3, P. 433–455.

6. Pomorski D., Perche P.B. Diagnostic et arbre de decision: Application a la surveillance partielle d'un moteur asynchrone" // JESA. 2000. Vol. 34, № 4. P.441–477.

7. Labaroud A. Le diagnostic automatique des defaillances des systemes electromechniques // Memoire de magistere. INHC, 1997.

8. Bocck M.J. Experiments in the application of Neural Networks to Rotating machine fault daignosis // IEEE intern, joint conf. On neural network. 1992, P. 769–774.

9. Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C., Vas P. A fuzzy logic approach to on-line induction motor diagnostics based on stator current monitoring // IEEE-KTH. Stockholm, Sweden, June, 1995. P.156–161.

10. Felippitti F., Franceshini G., Tassoni C., Senior Vas P. AI Techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple Effect // IEEE Transaction on industries applications. 1998. Vol.34, № 1. P.98–108.

11. Rostaing G. Diagnostic de defect dans les entrainements electriques: These de Doctorat. Laboratoire d'electrotechnique de Grenoble, 1997.

12. Shimakura Y., Inagaki J., Fukui S., Hori S. An artificial neural network and knowledge based method for reasoning causes of power network faults // Technology Update series, TERR. 1996 . P.250–254.

**Шетат Бухемис** – директор научно-исследовательской лаборатории электрификации промышленных предприятий Бумердесского (Boumerdes) университета, Алжир, кандидатскую диссертацию защитил в МЭИ в 1989 г. Государственная межвузовская комиссия присвоила автору звание доктора техн. наук в 1997 г.

**Ходжа Джалал Эддин** – ассистент кафедры "Электро-техника" Мсиласского (Msila) университета, Алжир, докторант. Окончил Бумердесский институт углеводородов и химии. В 2000 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности "Электрическое оборудование промышленных установок".

## Учет перераспределения ферромагнитных частиц в магнитной жидкости, находящейся в неоднородном магнитном поле герметизатора

КАЗАКОВ Ю.Б., САЙКИН М.С., ЩЕЛЫКАЛОВ Ю.Я.

*Рассмотрен алгоритм численного учета перераспределения концентрации ферромагнитных частиц в магнитной жидкости, находящейся в неоднородном нелинейном магнитном поле герметизатора. Оценено влияние перераспределения концентрации ферромагнитных частиц на изменение намагниченности магнитной жидкости и удерживаемый перепад давлений.*

*Considered algorithm numerical account of redistribution concentrations magnetic particles in magnetic fluid, placed in the lumpy nonlinear magnetic field sealing device. Valued influence of redistribution magnetic particles on change magnetization of magnetic fluid and deducted pressure difference.*

Среди электромеханических магнитожидкостных герметизаторов (ЭМЖГ) наиболее распро-

странена цилиндрическая конструкция ЭМЖГ с магнитной жидкостью (МЖ) в зазоре

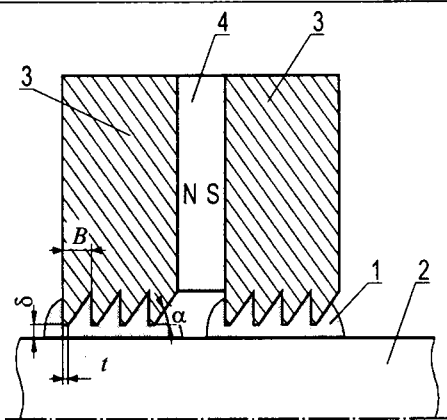


Рис.1. Конструкция ЭМЖГ:

1 – магнитная жидкость; 2 – вал; 3 – полюсные приставки; 4 – постоянный магнит

$\delta = 0,05 \div 0,3$  мм между валом и полюсной системой, содержащей постоянные магниты (ПМ) [1]. С целью создания неоднородного магнитного поля в зазоре на полюсных приставках и/или на валу выполняют зубцы (рис.1). Размер ферромагнитных частиц в МЖ достигает 40 нм. Их концентрация  $C = 5 \div 20\%$ . МЖ концентрируется в области зазора с максимальной индукцией  $B$ .

Максимальный статический удерживаемый перепад давления ЭМЖГ определяется из уравнения Бернулли

$$\Delta p_{\text{ст}} = \mu_0 \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} M dH, \quad (1)$$

где  $M$  – намагниченность МЖ;  $H_{\min}$  и  $H_{\max}$  (рис.2) – напряжённости магнитного поля на поверхностях МЖ, обращённых к областям с меньшим и большим давлениями при критическом положении МЖ.

МЖ имеет отличающиеся нелинейные магнитные характеристики  $M = f(H)$  при разных концентрациях ферромагнитных частиц. В об-

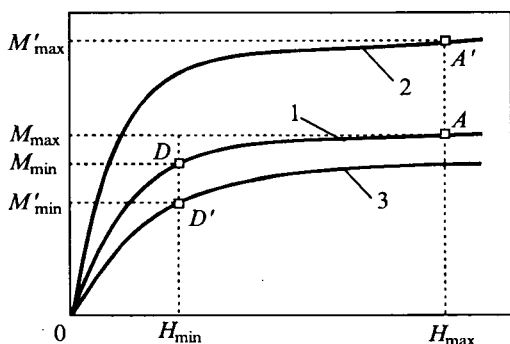


Рис.2. Магнитные характеристики МЖ:

1 – при концентрации ферромагнитных частиц  $C$ ; 2 – при концентрации  $C_I > C$ ; 3 – при концентрации  $C_{II} < C$

ласти магнитного насыщения, при больших значениях  $H$ , МЖ имеет намагниченность насыщения  $M_s$ . Точность определения перепада давлений зависит от точности расчёта магнитного поля с учётом нелинейностей магнитных характеристик МЖ, ПМ, сталей. Применялся метод конечных элементов [2].

При использовании линейной модели нелинейной системы

$$\Delta p_{\text{ст}} = 0,5 \mu_0 (M_{\max} + M_{\min}) (H_{\max} - H_{\min}). \quad (2)$$

Инженерные расчёты перепада давлений часто проводятся в предположении, что МЖ находится в насыщенном состоянии. Тогда

$$\Delta p_{\text{ст}} \approx \mu_0 M_s (H_{\max} - H_{\min}) = M_s (B_{\max} - B_{\min}). \quad (3)$$

В течение некоторого времени после заправки МЖ в ЭМЖГ происходит возрастание  $\Delta p_{\text{ст}}$  до 70%. Это обусловлено перераспределением начальной концентрации ферромагнитных частиц по объёму МЖ в неоднородном магнитном поле ЭМЖГ. Частицы стягиваются в области МЖ с наибольшей индукцией, но повышение их концентрации ограничивается силами отталкивания, обусловленными диполь-дипольным взаимодействием, действием защитных оболочек поверхностно-активных веществ на частицах и расклинивающим действием основы. Чем больше градиент магнитного поля в зазоре ЭМЖГ (для индукции может достигать  $\nabla B = 1000$  Тл/м), тем сильнее перераспределение концентрации частиц по частям объёма МЖ.

Для учета этого эффекта возможно подразделение МЖ на две области [3] (рис.3), принимая, что в области I концентрация магнитных

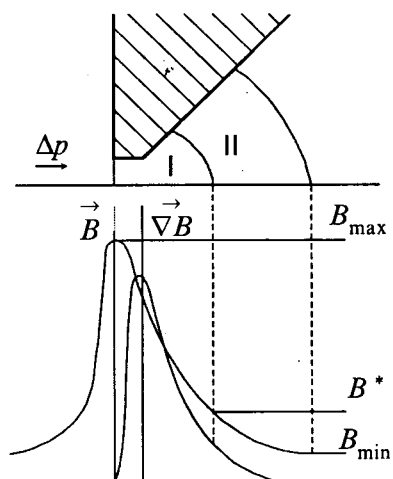


Рис.3. Разделение МЖ на две области и распределение магнитной индукции и её градиента по поверхности вала

частиц  $C_I$  больше начальной  $C$ , а в области II –  $C_{II}$  меньше начальной. Граница разделения областей может быть проведена для  $\nabla B = 150 \div 350$  Тл/м, при соответствующей индукции  $B^*$ . Перераспределение концентраций частиц приводит к пропорциональному изменению намагниченностей насыщения этих областей МЖ

$$M_{sI} = N_I m \equiv C_I; \quad M_{sII} = N_{II} m \equiv C_{II},$$

где  $m$  – магнитный момент ферромагнитной частицы;  $N$  – число частиц в единице объёма, определяющее их концентрацию в МЖ.

Соотношение (3) преобразуется в

$$\Delta p_{ст} \approx M_{sI} (B_{\max} - B^*) + M_{sII} (B^* - B_{\min}). \quad (4)$$

Так как объём МЖ области I много меньше объёма области II, то концентрация частиц в области II уменьшается в меньшей степени, чем увеличивается в области I и можно принять  $M_{sII} \approx M_s$ . В табл.1 приведены экспериментально-расчётные значения максимальной индукции в МЖ  $B_{\max}$  и намагниченности насыщения области I МЖ  $M_{sI}$ , полученные в [4] для ряда ЭМЖГ ( $M_s = 24$  кА/м).

Таблица 1

| $B_{\max}$ , Тл     | 1,2  | 1,4 | 1,55 | 1,77 |
|---------------------|------|-----|------|------|
| $M_{sI}$ , кА/м     | 31   | 35  | 39   | 42   |
| $M_{sI} / B_{\max}$ | 25,8 | 25  | 25,2 | 23,7 |

Так как практически сохраняется пропорциональность между  $B_{\max}$  и  $M_{sI}$ , можно принять, что распределение концентрации ферромагнитных частиц МЖ в неоднородном магнитном поле ЭМЖГ соответствует распределению индукции магнитного поля в МЖ.

Разделение объёма МЖ на две подобласти с высокой и низкой концентрациями частиц повышает точность расчёта критического перепада давлений, но если при численном расчёте магнитного поля производится дискретизация области МЖ на множество элементов, то правильнее определять характеристики всех элементов [5]. Каждому элементу МЖ с номером  $L$  из общего количества  $E$  должна соответствовать своя концентрация частиц, намагниченность и магнитная проницаемость.

При расчёте магнитного поля нужно задать распределение концентрации частиц в МЖ. Возникает дилемма, когда, не зная распределения концентрации частиц, невозможно точно рассчитать магнитное поле. Но, не зная распределение магнитного поля, невозможно определить

распределение концентрации частиц в МЖ. Определение магнитного состояния ЭМЖГ может быть выполнено путем неоднократного расчёта магнитного поля. Организуется внешний итерационный цикл, в котором по результатам предыдущего расчёта поля выполняется корректировка распределения концентрации частиц. Однако, учитывая, что расчёт нелинейного магнитного поля производится итерационным методом Ньютона, можно производить корректировку распределения концентрации ферромагнитных частиц на итерациях метода Ньютона, что позволяет отказаться от внешнего уточняющего итерационного цикла.

Так как общее число ферромагнитных частиц в МЖ при любом их перераспределении одно и то же, то их среднееобъёмная концентрация должна оставаться равной начальной концентрации. Считаем, что среднееобъёмная концентрация ферромагнитных частиц соответствует средневзвешенной индукции магнитного поля в МЖ  $B_{cp}$ :

$$B_{cp} = \frac{\sum_{L=1}^E B_L V_L}{\sum_{L=1}^E V_L},$$

где  $B_L$  и  $V_L$  – индукция и объём элемента  $L$  МЖ.

Изменяем концентрацию частиц в каждом элементе  $L$  МЖ пропорционально своему коэффициенту перераспределения  $K_L$

$$K_L = B_L / B_{cp}; \quad C_{L,K \neq 1} = K_L C_{L,K=1},$$

где  $C_{L,K=1}$  – начальная концентрация, соответствующая однородному магнитному полю при  $K = 1$ . Коэффициент  $K$  показывает во сколько раз в данном элементе МЖ изменяется концентрация ферромагнитных частиц по сравнению с начальной.

Такой алгоритм перераспределения концентрации ферромагнитных частиц по элементам МЖ позволяет обеспечить сохранение неизменной среднееобъёмной концентрации частиц и равной ее начальной концентрации.

Намагниченность элемента  $L$  МЖ

$$M_{L,K \neq 1} = K_L M_{L,K=1}.$$

Используя для МЖ соотношение  $B = \mu_0 (M + H)$ , можно получить выражение для магнитной проницаемости МЖ в элементе  $L$  ( $\mu_{L,K \neq 1}$ ) с учётом перераспределения концентрации ферромагнитных частиц

$$\mu_{L,K \neq 1} = \frac{\mu_{L,K=1}}{\frac{\mu_{L,K=1}}{\mu_0} (1 - K_L) + K_L}.$$

Были выполнены расчёты магнитных полей



в ЭМЖГ без учёта и с учётом перераспределения концентрации ферромагнитных частиц в МЖ, с намагниченностью насыщения в однородном магнитном поле  $M_s = 24$  кА/м. Учёт перераспределения концентрации ферромагнитных частиц не приводит к существенному увеличению времени расчёта нелинейного магнитного поля. Средневзвешенная индукции магнитного поля в МЖ в результате решения составила  $B_{cp} = 0,548$  Тл. Каждый элемент МЖ приобрёл свою магнитную проницаемость, намагниченность и концентрацию ферромагнитных частиц.

На рис.4 представлено изменение коэффициента перераспределения концентрации ферромагнитных частиц  $K_L$  в элементах МЖ вдоль вала под зубцом. Концентрация частиц в этих элементах МЖ меняется, по сравнению с начальной концентрацией, в 0,49–3,34 раза. При рассмотрении других сечений МЖ график изменяется.

На рис.5 представлено изменение намагниченности МЖ в зазоре вдоль вала. Намагниченности элементов МЖ существенно изменяются из-за эффекта перераспределения частиц. На

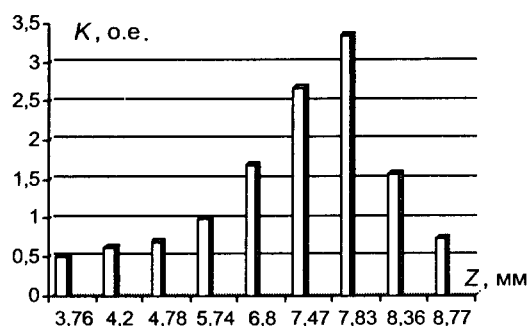


Рис.4. Изменение коэффициента перераспределения концентрации ферромагнитных частиц в МЖ вдоль вала

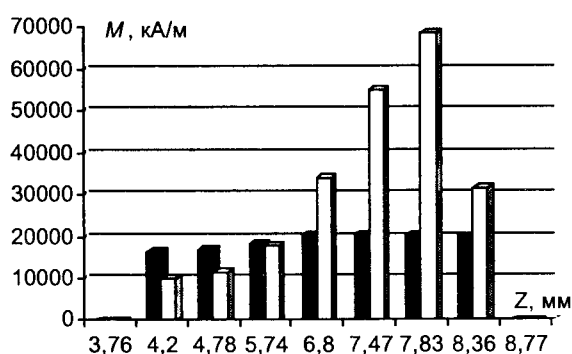


Рис.5. Изменение намагниченности элементов МЖ в зазоре вдоль вала под зубцом без ( $K=1$ ) и с учетом ( $K \leq 1$ ) перераспределения концентрации ферромагнитных частиц:

■ —  $K=1$ ; □ —  $K \leq 1$

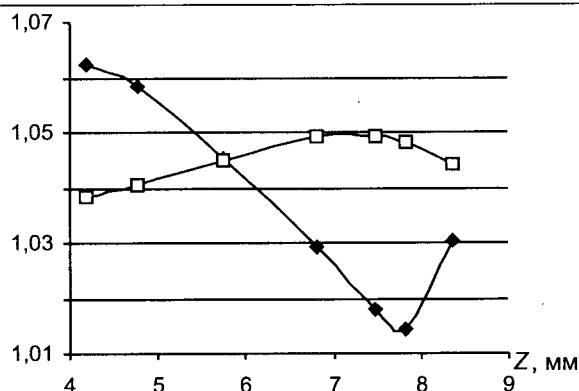


Рис.6. Изменение относительной магнитной проницаемости элементов МЖ в зазоре вдоль вала под зубцом без ( $K=1$ ) и с учетом ( $K \leq 1$ ) перераспределения концентрации частиц:

◆ —  $K=1$ ; □ —  $K \leq 1$

рис.6 представлено изменение относительной магнитной проницаемости элементов МЖ в зазоре. Если магнитная проницаемость МЖ в области высоких индукций под кромкой зубца без учёта перераспределения концентрации частиц снижается, то при учёте эффекта перераспределения из-за возрастания концентрации частиц магнитная проницаемость МЖ в этой зоне даже возрастает. Однако вследствие малого значения магнитной проницаемости МЖ, влияние эффекта перераспределения концентрации частиц в МЖ на распределение индукции магнитного поля вдоль вала значительно меньше.

С изменением концентрации ферромагнитных частиц в МЖ её магнитная характеристика меняется, точка  $A$  переходит в точку  $A'$ , а точка  $D$  в  $D'$  (рис.2). Соотношение (2) модифицируется в

$$\Delta p_{ст} = 0,5(M'_{min} + M'_{max})(B_{max} - B_{min}). \quad (5)$$

#### Параметры магнитного состояния МЖ в ЭМЖГ

|                   |       |
|-------------------|-------|
| $B_{max}$ , Тл    | 1,5   |
| $B^*$ , Тл        | 0,375 |
| $B_{min}$ , Тл    | 0,234 |
| $M_{sl}$ , кА/м   | 24    |
| $M_{sl}$ , кА/м   | 38    |
| $M_{min}$ , кА/м  | 16,28 |
| $M_{max}$ , кА/м  | 20,51 |
| $M'_{min}$ , кА/м | 10,07 |
| $M'_{max}$ , кА/м | 68,65 |

Опытное значение максимального критического перепада давлений ЭМЖГ составило  $0,5 \cdot 10^5$  Па. Результаты расчёта критического пе-

репада давлений по разным соотношениям и погрешности этих расчётов в сравнении с экспериментом приведены в табл.2.

Таблица 2

| Соотношение                       | (2)                 | (3)                 | (4)                 | (5)                 |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $\Delta p_{\text{кр}}, \text{Па}$ | $0,2329 \cdot 10^5$ | $0,3038 \cdot 10^5$ | $0,4613 \cdot 10^5$ | $0,4983 \cdot 10^5$ |
| Погрешность, %                    | -53,42              | -39,24              | -7,74               | -0,34               |

### Выводы

1. Разработан алгоритм численного учёта перераспределения концентрации магнитной фазы МЖ в неоднородном нелинейном магнитном поле ЭМЖГ в предположении распределения ферромагнитных частиц в соответствии с распределением магнитной индукции.

2. Показано существенное, более чем в 3 раза, перераспределение концентрации ферромагнитных частиц и намагниченности элементов МЖ.

3. Расчёт критического перепада давлений по предложенному методу с учётом перераспределения концентрации ферромагнитных частиц даёт удовлетворительное совпадение с экспериментом.

### Список литературы

1. Орлов Д.В., Михалев Ю.О., Мышкин Н.К. и др. Магнитные жидкости в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993.

2. Казаков Ю.Б., Щелыкалов Ю.Я. Численный анализ взаимовлияющих магнитного и теплового полей в магнит-

тожидкостном герметизаторе // Электротехника. 2002. № 6. С. 57–61.

3. Сайкин М.С., Евсин С.И., Щелыкалов Ю.Я. Учёт магнитной диффузии в расчёте критического перепада давлений уплотнения // Тез. докл. 7 междунар. конф. по магнитным жидкостям. Иваново, 1996. С. 154–155.

4. Сайкин М.С. Разработка и исследование электро-механических магнито-жидкостных герметизаторов специального технологического оборудования: Автореф. дис.... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1998.

5. Казаков Ю.Б., Тихонов А.И. Численный расчет неоднородного нелинейного магнитного поля герметизатора с учетом перераспределения концентрации магнитной фазы в магнитной жидкости // Сб. научн. трудов 9 междунар. конф. по магнитным жидкостям. Плес, 2000. Т. 2. С. 373–377.

**Щелыкалов Юрий Яковлевич** – заведующий кафедрой электро-механики, проректор Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ), доктор техн. наук, проф. В 1962 г. окончил электро-механический факультет (ЭМФ) Ивановского энергетического института (ИЭИ). В 1986 г. защитил докторскую диссертацию "Математическое моделирование и автоматизация расчетов полей в электрических машинах и трансформаторах".

**Казаков Юрий Борисович** – профессор кафедры электро-механики ИГЭУ, доктор техн. наук. В 1976 г. окончил ЭМФ ИЭИ. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию "Численное моделирование и разработка конструкций электрических машин с учетом взаимного влияния физических полей".

**Сайкин Михаил Сергеевич** – доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии ИГЭУ, канд. техн. наук. В 1979 г. окончил ЭМФ ИЭИ. В 1998 г. защитил кандидатскую диссертацию "Разработка и исследование электро-механических магнито-жидкостных герметизаторов специального технологического оборудования".

## Исследование структуры и электросопротивления коллекторных пленок, образованных щетками на основе твердых смазок с различной электропроводностью

ВИЛЬКИН М.А., СЕМЕНОВ Ю.И., НИКИФОРОВ Ю.Н.

*Показано, что при работе в вакууме электросопротивление коллекторных плёнок, содержащих  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WNbS}_2$ , практически совпадает, в то время как сопротивление материала смазки  $\text{MoS}_2$  на 5-6 порядков выше. Установлено также, что при работе щёток, содержащих  $\text{WNbS}_2$ , в вакууме наблюдается значительный рост сопротивления коллекторных плёнок, что свидетельствует о нестабильности свойств смазки при повышении тока.*

Износостойкость щёток, фрикционные и электрические свойства скользящего электрического контакта в значительной степени определяются плёнками, образующимися на поверхности коллектора.

При работе скользящего электрического контакта в условиях вакуума вследствие снижения в окружающей атмосфере содержания кислорода и влаги ухудшаются антифрикционные свойства графита, разрушаются имевшиеся на повер-

хности коллектора пленки окислов, развиваются процессы абразивного трения, наблюдаются задиры и схватывание контактирующих поверхностей. В результате износ щёток увеличивается в десятки и сотни раз.

Для снижения износа щёток в условиях пониженного атмосферного давления наиболее широко применяются добавки дисульфида молибдена, смазывающие свойства которого не зависят от изменения давления и температуры окружающей атмосферы [1].

Однако при использовании дисульфида молибдена, обладающего высоким электросопротивлением (около  $8,3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), особенно на электрических машинах с низким напряжением питания, потери в контакте щётка – коллектор превышают допустимый уровень.

В отличие от дисульфида молибдена ряд синтезированных халькогенидов переходных металлов V группы периодической системы Д.И. Менделеева ( $\text{NbS}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$  и др.), а также квазибинарные сплавы ( $\text{WNbS}_2$ ,  $\text{MoNbS}_2$  и др.) наряду с высокими антифрикционными свойствами имеют низкое электросопротивление (около  $10^{-3}$ – $10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ).

В настоящей статье приведены результаты изучения структуры и электросопротивления отдельных участков плёнок на медном и серебряном коллекторе, образованных щётками с добавками твердых смазок с различным сопротивлением при нормальном и пониженном атмосферном давлении.

Компонентный состав (% по массе) опытных композиций щёток приведен в таблице.

Исследования проводились на короткозамкнутых коллекторах из меди и серебра диаметром 18 мм.

Внешний вид рабочей поверхности коллектора и структуры плёнок изучались с помощью микроскопа МБИ-6 при увеличении от 125 до  $1000\times$ .

Для измерения сопротивления и снятия вольт-амперных характеристик исследуемых участков коллекторной пленки был применен микротвердомер ПМТЗ, в котором в качестве измерительного электрода использовалась серебряная проволока диаметром 0,8 мм, имеющая радиус закругления на конце 0,05–0,08 мм. Измерения проводились при нагрузке 10–15 мН.

Участок на поверхности коллектора, выбранный для измерения сопротивления, устанавливался на оптической части микротвердомера, после чего на этот участок опускался измерительный электрод.

Вольт-амперные характеристики снимались в автоматическом режиме с записью на двухкоординатный самопишущий потенциометр ПДС-021.

Измерение сопротивления проводилось методом амперметра-вольтметра при измерительном токе 1 мА и напряжении источника питания (батареи) 1,4 В.

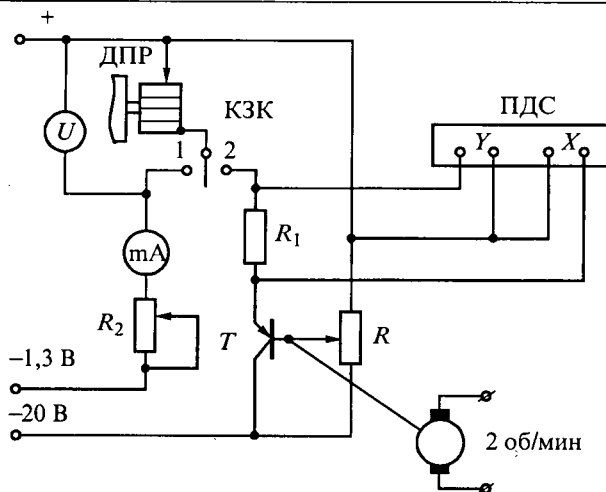
Электрическая схема стенда для определения указанных параметров приведена на рисунке.

Наработка коллекторных плёнок проводилась в течение 10 ч без тока и при плотностях тока 0,05; 0,10 и 0,20 А/мм<sup>2</sup>, при окружной скорости коллектора 2,5 м/с, в нормальных климатических условиях при температуре 20–25°C и влажно-

Сопротивление коллекторных плёнок, образованных различными щёточными композициями

| Вариант | Компонентный состав щёток, % по массе | Материал коллектора | Сопротивление плёнок, Ом  |         |         |         |   |         |          |         |
|---------|---------------------------------------|---------------------|---|---------|---------|---------|---|---------|----------|---------|
|         |                                       |                     | Условия наработки коллекторных плёнок                                   |         |         |         |   |         |          |         |
|         |                                       |                     | в нормальных атмосферных условиях при плотности тока, А/мм <sup>2</sup> |         |         |         | при давлении окружающей среды 1,33–13,3 кПа и плотности тока, А/мм <sup>2</sup> |         |          |         |
|         |                                       |                     | 0   | 0,05    | 0,10    | 0,20    | 0   | 0,05    | 0,10     | 0,20    |
| 1       | 75 C + 25 Cu                          | Cu                  | 1,2–700   | 1,0–260 | 1,0–40  | 1,5–23  | 1,3–420   | 1,4–21  | –        | –       |
| 2       | 75MoS <sub>2</sub> + 25Cu             | - " -               | 3,5–370   | 2,3–300 | 4,0–300 | *       | 3,7–4,2   | 3,8–4,5 | 3,8–20   | *       |
| 3       | 75WNbS <sub>2</sub> + 25Cu            | - " -               | 1,3–370   | 1,5–270 | 1,3–220 | *       | 1,2–2,4   | 1,4–25  | 1,4–55,5 | –       |
| 4       | 100C                                  | - " -               | 0,9–300   | 1,0–110 | 1,0–3,1 | 1,0–50  | 1,0–2,5   | 1,3–3,0 | 1,3–2,8  | 1,2–3,6 |
| 5       | 100WNbS <sub>2</sub>                  | - " -               | 1,1–750   | **      | 1,5–280 | 1,4–350 | 1,2–600   | **      | 1,1–220  | 1,2–270 |
| 6       | 75C + 25 Ag                           | Ag                  | 0,9–1,6   | 1,0–1,4 | 1,1–1,5 | 1,1–2,0 | 1,3–1,5   | 1,1–3,9 | –        | *       |
| 7       | 75 MoS <sub>2</sub> + 25 Ag           | - " -               | 3,2–100   | 2,5–6,5 | 3,6–150 | *       | 3,3–3,5   | 3,4–4,0 | 3,4–5    | *       |
| 8       | 75 WNbS <sub>2</sub> + 25 Ag          | - " -               | 1,1–130   | 1,1–130 | 1,0–105 | *       | 1,1–1,4   | 1,2–30  | 1,2–25   | *       |

\* – наблюдается увеличение  $2 \Delta U$  до 8–10 В, интенсивное искрение и в ряде случаев перегорание токоведущих контактов;  
 \*\* – испытания не проводились



Электрическая схема стенда для исследования проводимости коллекторных плёнок

сти 50–80 %, а также в вакууме 1,33–13,8 кПа.

Микроскопическое изучение коллекторных плёнок, образованных щётками исследуемых композиций, выявило, что все наблюдаемые плёнки состоят из металлических участков и участков, имеющих в составе твёрдые смазки шириной 0,02–0,05 мм, ориентированные в направлении вращения.

Все наблюдаемые плёнки можно условно разделить в зависимости от интенсивности износа щёток на три вида:

1. Плёнки с чётко выраженной ориентацией полос вдоль направления вращения коллектора.
2. Плёнки, состоящие из участков без видимой ориентации.
3. Плёнки, содержащие чётко ориентированные полосы и участки с однородной структурой.

Плёнки 1-го вида, как правило, образуются при работе щеточных композиций, имеющих высокую износостойкость, плёнки 3-го вида – при работе щёток с меньшей износостойкостью и плёнки 2-го вида, когда наблюдается их интенсивный износ.

Результаты измерений, приведенные в таблице, показывают значительную неоднородность электросопротивления отдельных участков плёнок.

Например, при наработке плёнок щётками варианта 1 без тока ее сопротивление составляет от 1,2 до 700 Ом, причём большая часть полученных значений (около 80–90%) находится в интервале от 1,2 до 10 Ом. Сопротивление на участках коллектора, не покрытых плёнками, изменяется в пределах от 0,18–0,25 Ом.

Большие разбросы значений сопротивления можно объяснить наличием на отдельных участ-

тках коллектора плёнок из окислов, что подтверждается результатами испытаний в вакууме, где после работы исследуемых композиций сопротивление уменьшается практически на 1–2 порядка за счёт преобладания процессов разрушения окисных плёнок над их восстановлением. При этом наблюдается зависимость максимальных значений сопротивления плёнок от токовой нагрузки, с увеличением которой значения сопротивления снижаются, что также объясняется интенсификацией процессов разрушения окислов.

При испытаниях щёток варианта 5 наблюдалось сохранение участков с большим омическим сопротивлением как в нормальных климатических условиях, так и после наработки в вакууме. Увеличение нагрузки также практически не сказывалось. Это объясняется отсутствием в составе щёток шлифующих частиц (например, меди) и высокими антифрикционными свойствами твёрдых смазок при работе в условиях вакуума, где окисные плёнки за 10 ч работы щёточно-коллекторного узла не успевают разрушиться.

Из рассмотрения значений сопротивления плёнок вариантов 2 и 3 в высотных условиях следует, что нижнее значение сопротивления коллекторных плёнок щёток, содержащих 75%  $\text{MoS}_2$  и 25% Cu (вариант 2) и 75%  $\text{WNbS}_2$  и 25% Cu (вариант 3), отличаются на 1–2 Ом (практически совпадают), в то время как сопротивление  $\text{MoS}_2$  на 5–6 порядков выше, чем  $\text{WNbS}_2$ .

Более того, в вакууме при токе 0,05 и 0,10 А/мм<sup>2</sup> верхнее значение сопротивления плёнок с  $\text{WNbS}_2$  значительно выше, чем у плёнок, образованных щётками, содержащими дисульфид молибдена.

Подобное же положение наблюдается у щёток вариантов 7 и 8, в которых вместо медного порошка применён серебряный порошок при работе на серебряном коллекторе.

Полученные экспериментальные данные можно объяснить частичным разрушением материала смазки  $\text{WNbS}_2$  при работе в условиях вакуума и повышенной токовой нагрузки.

Анализ вольт-амперных характеристик участков плёнок, образованных щётками вариантов 2, 4 и 5, показывает, что проводимость на участках коллектора с низким (до единиц Ом) сопротивлением металлическая, т.е. вольт-амперные характеристики имеют линейный характер и не зависят от полярности приложенного напряжения.

Проводимость участков плёнок, содержащих  $\text{MoS}_2$  (вариант 2) носит нелинейный характер. При увеличении напряжения, приложенного к

контакту, до 1 В наблюдается уменьшение сопротивления примерно на порядок (с 1000 до 100 Ом). При дальнейшем повышении напряжения существенное воздействие на проводимость плёнок оказывает значение протекающего тока за счёт их электрического пробоя и термических эффектов. Электропроводность указанных участков зависит также от полярности приложенного напряжения, что указывает на полупроводниковую проводимость. При положительном потенциале на серебряном электроде сопротивление коллекторной плёнки значительно выше, чем при обратной полярности, что можно объяснить наличием на поверхности плёнки зоны, обогащенной серой [2].

Результаты исследования плёнок, образованных щётками варианта 5, показали, что их проводимость также носит нелинейный, полупроводниковый характер, однако отсутствует ярко выраженная зависимость от полярности приложенного напряжения.

#### Выводы

1. Коллекторные плёнки, образованные щётками всех исследованных композиций на медном и серебряном коллекторе, неоднородны по электропроводности и имеют вид полос, покрытых и непокрытых твёрдыми смазками, ориентированными по направлению вращения.

2. Проводимость плёнок зависит от состава исходного материала щёток и может носить как

металлический, так и полупроводниковый характер.

3. Электросопротивление отдельных участков коллектора отличается на 2–4 порядка.

4. Электросопротивление плёнок, содержащих  $\text{MoS}_2$ , практически совпадает с сопротивлением аналогичных плёнок, содержащих  $\text{WNbS}_2$ , в то время как электропроводность последней на 5–6 порядков выше, чем у дисульфида молибдена.

5. Электросопротивление плёнок  $\text{WNbS}_2$  при работе в высотных условиях возрастает с повышением плотности тока.

#### Список литературы

1. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961.
2. Shobert E. Electrical resistance of carbon brushes on copper rings // Power Apparatus and Systems. 1954. P.78.

**Вилькин Матвей Айзикович** – работает в ФГУП "НИИЭИ", канд. техн. наук. Окончил Ивановский химико-технологический институт в 1949 г. Защитил кандидатскую диссертацию в 1965 г.

**Семенов Юрий Иванович** – работает в ФГУП "НИИЭИ", канд. техн. наук. Окончил факультет "Электрооборудования летательных аппаратов" ЛИАП в 1968 г. Защитил кандидатскую диссертацию в 1978 г.

**Никифоров Юрий Николаевич** – работает в ФГУП "НИИЭИ". Окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И.Ульянова в 1963 г.

## Прогнозирование долговечности контактных соединений по данным тепловизионной диагностики

ВЛАСОВ А.Б.

*Рассматриваются актуальные вопросы, связанные с развитием тепловизионной диагностики как метода технической диагностики, который определяется ГОСТ. На примере данных тепловизионного контроля контактных соединений различных предприятий энергетической системы "Колэнерго" в течение 1989-2002 гг. изучен механизм и определена скорость старения контактных соединений. На основе анализа показателей грозовых перенапряжений дан прогноз показателей надежности для различных энергосистем.*

*In work are considered actual questions, connected with development termovision diagnostics, as method of the technical diagnostics, which is defined by standards. On example given termovision checking the electrical contacts different enterprise energy system "Kolenergo" during 1989-2002 gg. studied mechanism and is determined velocity of the diligence of the contact join. On base of the analysis of the factors of the storm overstrains is given forecast of the factors to reliability for different power systems.*

Тепловизионная диагностика как метод технической диагностики должна решать задачи диагноза и прогноза технического состояния оборудования и его отдельных частей, в част-

ности, контактных соединений (КС), в соответствии с требованиями стандартов. Согласно ГОСТ 27.002-89 [1] контактное соединение, как объект диагностики, может находиться в исправ-

ном, неисправном, работоспособном и неработоспособном состояниях. В частности, *неработоспособное состояние* – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической документации, *"частично-неработоспособное"* – состояние, при котором объект способен частично выполнять требуемые функции. Нарушение работоспособности контактного соединения – образование *дефекта* КС, проявляется в превышении температуры, которое с достаточной степенью точности регистрируется во время тепловизионных испытаний. Анализ требований ГОСТ 10432-82 [2] показывает: любое превышение температуры контактного соединения и проводника должно считаться отступлением от *исправного состояния*, и, следовательно, как один из видов отказа.

В процессе старения дефекта последний, проходя различные стадии своего развития, становится *критическим*, достигает *предельного состояния*, при котором дальнейшая эксплуатация КС недопустима или нецелесообразна, практически КС находится в *неработоспособном состоянии*, требует аварийного ремонта. ГОСТ 10434-82 описывает различные классы электрических КС, определяет требования по их электрическому сопротивлению, а также *критерии предельных состояний* – тепловые режимы в *предельном состоянии*: при протекании номинального тока наибольшая допустимая температура КС не должна превышать значений, указанных в ГОСТ.

Для экспертной оценки технического состояния КС необходимо произвести перерасчет данных с учётом многочисленных параметров и условий тепловизионной съёмки, в частности, для проверки, превысит ли температура КС предельную, задаваемую ГОСТ 10434-82, в данный период времени при максимальных или предполагаемых токах нагрузки. В то же время перерасчёт превышения температуры на заданное значение тока не может дать ответа на вопрос: как долго будет происходить процесс старения дефекта от момента его образования и обнаружения до перехода в неработоспособное состояние. Т.е. ни факт обнаружения дефекта с помощью тепловизионного метода, ни оценка (прогноз) температуры КС, ещё не решают в полной мере задач тепловизионной диагностики и, в частности, не позволяют ответить на ряд вопросов: с какой скоростью происходит старение дефекта, в чём причина образования дефектов КС на реальных объектах, через какое время будет дос-

тигнуто предельное (критическое) состояние, какова вероятность появления дефектов соединений в настоящее время и в будущем?

Для решения вопроса о скорости развития образовавшихся дефектов КС необходимо учесть динамику развития процесса их старения со временем на реальном оборудовании. Это позволит дать научно-обоснованные экспертные оценки и рекомендации о сроках ремонта, плановых и, если необходимо, о внеочередных тепловизионных обследованиях.

Данная задача решалась нами на примере аппаратных зажимов, дефекты которых являются самыми распространенными. Дефекты аппаратных зажимов появляются на разном оборудовании: разъединителях линий, вводах трансформаторов и т.п., но с большей вероятностью на ВЧ-заградителях. По-нашему мнению, это обусловлено основной причиной возникновения дефектов – грозовой деятельностью в районе подстанции или ГЭС [3, 4], что подтверждается также фактами одновременного обнаружения дефектов КС на оборудовании ВЛ 110–330 кВ, соединяющих несколько подстанций.

Для анализа процесса старения КС нами были выбраны типичные представители ВЧ-заградителей, которые имели дефекты КС в период 1989–2002 гг. на предприятиях Колэнерго. Тепловизионному обследованию подвергались различные типы: ВЗ-1000; ВЗ-2000, ВЗ-600, рассчитанные на различные предельные токи.

Очевидно, что специфика работы реальной энергосистемы не позволяет осуществлять длительную работу оборудования, на котором зафиксированы те или иные дефекты. Однако в ряде случаев по различным причинам ремонты откладывались и тепловизионный осмотр одного и того же ВЧ-заградителя производился неоднократно. Поскольку данные тепловизионных обследований получены при различных значениях температуры окружающей среды, тока нагрузки и других факторов, для их сравнения нами производился перерасчёт превышения температуры с помощью формул, рекомендуемых нормативными документами, а также по разработанной нами программе приведения данных тепловизионного контроля к единому критерию [5].

На рис.1 приведены данные изменения превышения температуры на аппаратных зажимах отдельных ВЧ-заградителей. Идентичное изменение температуры характерно для контактов на другом оборудовании (рис.2), в том числе контактов, выполненных опрессовкой, а также болтовых соединениях.

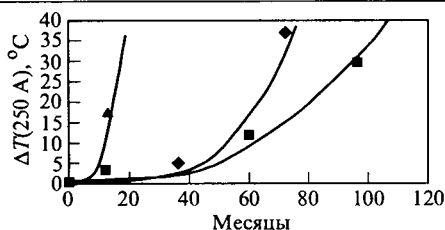


Рис.1. Изменение превышения температуры на различных КС

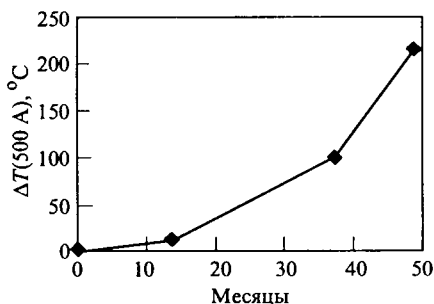


Рис.2. Изменение превышения температуры на аппаратном зажиме разъединителя линии

Характеристика имеет два выраженных участка: в течение первых месяцев (5–10 мес) его температура изменяется незначительно, резкий рост температуры начинается через 12–15 мес после образования дефекта. Замечено, что на прессованных контактах наблюдается тенденция к ускоренному росту температуры, но интенсивный рост превышения температуры также начинается не менее чем через 10–11 мес.

Проведем анализ значений превышения температуры КС, регистрируемого на 15 заградителях ВЗ-1000 (рис.3). Вероятность регистрации дефекта в период до 10 мес составляет 6%, в период до 12 мес – 47%, до 15 мес – 66 %, наконец, в период до 3 лет все нарушенные контакты могут быть обнаружены.

Учитывая идентичность аппаратных зажимов на оборудовании одного класса, нами разработана методика статистического анализа данных тепловизионного контроля на одинаковых объектах.

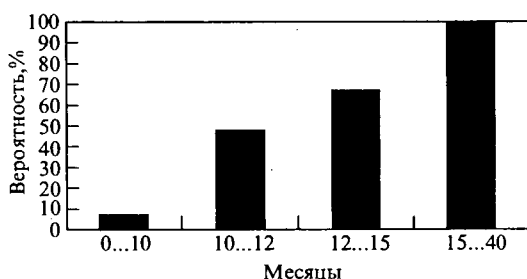


Рис.3. Вероятность обнаружения нарушенного контакта со временем

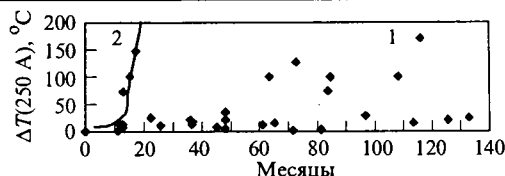


Рис.4. Наблюдаемые значения превышения температуры на ВЗ-1000 (пересчет на ток 250 А):

1 – различные КС; 2 – максимальная скорость старения

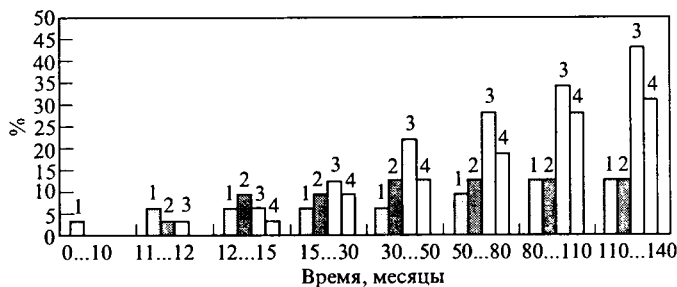


Рис.5. Распределение дефектов по времени старения:

1 – 1÷5°C; 2 – 6÷10°C; 3 – 10÷30°C; 4 – выше 30°C

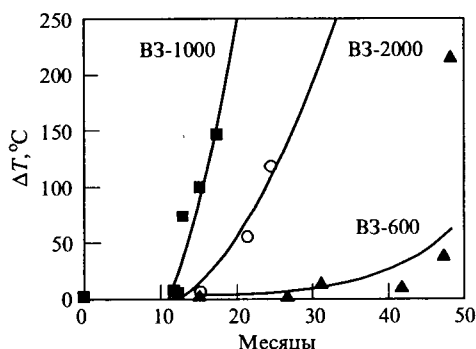


Рис.6. Обобщенные зависимости максимальной скорости старения аппаратных зажимов на ВЧ-заградителях

Рассмотрим применение этой методики на аппаратных зажимах ВЧ-заградителей типа ВЗ-1000. Данные по различным заградителям объединялись в общую выборку с пересчетом превышения температуры на одно и то же произвольное значение тока, например 250 А. По обобщенным данным строилась зависимость превышения температуры от времени (рис.4). Видно, что в промежутке 10–30 мес на различных дефектных контактах могут наблюдаться значения превышения температуры от 5 до 150°C и выше. Заметим, что на ряде объектов одни и те же дефекты проявляются в течение многих лет.

Для анализа распределения температуры нами выделены диапазоны температуры в соответствии с применяемыми практическими рекомендациями по ремонту: 1 – 1...5°C; 2 – 6...10°C;

3 – 10... 30°C; 4 – выше 30°C, и подсчитано количество и процент дефектов, проявляющихся через определенное время. На рис.5 приведено распределение дефектов по времени старения. Видно, что превышение температуры на вновь образуемых дефектных соединениях не превышает 2°C через 5–10 мес после последнего тепловизионного обследования. Рост температуры дефектных КС регистрируется через 11–12 мес. Распределение по температурным диапазонам составляет соответственно: 6,25; 3,1; 3,1; 0%, т.е. за период до 12 мес (после последнего осмотра) новых дефектов, требующих аварийного ремонта, не наблюдается. Например, при измерениях в период до 12–15 мес распределение по температурным диапазонам составляет 6,25; 9,4; 6,25; 3,1%, т.е. появляются дефекты, требующие в том числе, аварийного ремонта и т.д.

Полученные данные показывают, что скорость старения идентичных КС неодинакова, однако, поскольку в нашу задачу входит определение максимальной скорости их старения, ограничимся данными, характеризующими наиболее быстрое превышение температуры (рис.4, кривая 2). На рис.6 приведены обобщенные данные, характеризующие максимальную скорость старения КС аппаратных зажимов ВЧ-заградителей различного типа. Видно, что характеристики идентичны: максимальный рост превышения температуры проявляется не ранее 10 мес после окончания грозового сезона.

Процесс старения дефектных контактных соединений характеризуется рядом особенностей, которые невозможно описать без понимания физической природы старения данных объектов диагностики.

Для математического описания процесса старения, воспользуемся литературными данными, описывающими процесс старения многоамперных электрических КС [6]. Установлено, что электрическое сопротивление  $R_{к.с}$  соединений определяется многочисленными факторами (влажностью, температурой воздуха, удельным электрическим сопротивлением материала контакта и деталей, степенью подготовки сопрягаемых поверхностей перед сборкой, режимами работы электротехнических установок, контактными нажатиями и т.п.). Характер воздействия каждого фактора достаточно изучен, поэтому выделим наиболее существенные факторы, которые определяют скорость старения дефектного контактного соединения.

Ряд факторов действует непрерывно в течение всего срока эксплуатации оборудования. К

ним относится, например, влажность окружающей среды, воздействующая на КС в течение всего периода их эксплуатации и влияющая на физико-механические свойства и параметры материала КС, что проявляется в изменении электрического сопротивления и состояния поверхностных слоев. Под воздействием влажности происходит образование пленок на поверхности контактирующих элементов. При повышенной относительной влажности и нормальной температуре сопротивление изменяется незначительно. Тепловые поля, также воздействующие на КС в течение всего периода эксплуатации, обусловлены как воздействием окружающей среды, так и выделением теплоты самими соединениями при протекании через них тока. Изменение физико-химических свойств и параметров контактов при высоких температурах связано с изменением электрического сопротивления, зависящим от свойств используемого материала, при возрастании температуры окислительные процессы активизируются.

Электрический контакт между сопрягаемыми элементами осуществляется через области, содержащие так называемые "а-пятна" [6], число которых со временем практически не изменяется; поэтому срок службы контактов из различных металлов, например, меди, алюминия, алюминиевых сплавов, достаточно большой. Размеры непроводящих пленок, растущих в результате протекания процессов адсорбции, химических реакций и диффузии, зависят от влажности, температуры среды и контактов, агрессивности среды, атмосферного давления, солнечной радиации и т.п. [6].

Несмотря на многообразие действующих факторов, работоспособность большинства КС остается неизменной на протяжении многих лет. Это достигается соответствующей обработкой контактной поверхности перед эксплуатацией. По-видимому, пленка окисла не проникает под контактирующие поверхности и её рост ограничен. Длительное время (годы) контактное соединение находится в исправном состоянии, поэтому тепловизионный контроль не фиксирует превышения температуры КС.

По-нашему мнению, свойства контактной области изменяются при попадании молнии в высоковольтную линию и образовании волны перенапряжения. Образование дефекта на конкретном контактном соединении является вероятностным процессом и может быть связано с кратковременным перегревом КС, изменением его микроструктуры, контактного нажатия и



т.п., и, вследствие этого, инициированием начала роста оксидных плёнок непосредственно в область электрического контакта между контактирующими поверхностями. Именно с этого момента старение дефекта осуществляется в соответствии с закономерностями развития оксидных плёнок со временем.

В связи с данным предположением рассмотрим особенности развития оксидных плёнок и влияние нагрева контактного соединения на этот процесс.

Аналогично [6] предполагаем, что контактная граница имеет однородные характеристики по всей поверхности контакта, оксидная плёнка и диффундирующий слой между элементами контакта имеют кольцевую форму, плёнка растёт вследствие диффузии в радиальном направлении. Контактное сопротивление со временем изменяется и в рамках диффузионной модели обусловлено проникновением плёнки окислов в зону контакта за счёт диффузии атома оксида в кристаллической решетке металла. Согласно модели, через время  $t$  после развития дефекта переходное сопротивление будет определяться соотношениями [6]:

$$R_{\text{пер}}(t)/R_{\text{пер}}(0) = a_0/[a_0 - x(t)]; \quad x(t) = (2Dt)^{1/2};$$

$$D(T) = D_0 \exp[-U/kT];$$

$$R_{\text{пер}}(t)/R_{\text{пер}}(0) = 1/\{1 - ((2Dt)^{1/2}/a_0) \exp(-U/kT)\}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{пер}}(t)$ ,  $R_{\text{пер}}(0)$  – сопротивления в момент времени  $t$  и  $t = 0$ ;  $a_0$  – радиус металлического пятна касания в момент времени  $t = 0$ ;  $x(t)$  – глубина диффузионного проникновения пленки оксида в зону пятна касания через время  $t$ ;  $D(T)$  – коэффициент диффузии, зависящий от энергии активации процесса  $U$  и абсолютной температуры  $T$ ;  $D_0$  – постоянная;  $k$  – газовая постоянная.

На рис.7 приведены результаты расчета по выражению (1) при физических параметрах, ха-

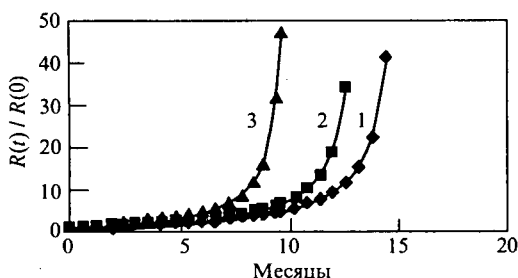


Рис.7. Расчетные значения  $R(t)/R(0)$  (без учета нагрева контакта):

1 –  $T_1 = 297$  К,  $a_0 = 10^{-6}$  м; 2 –  $T_2 = 298$  К,  $a_0 = 10^{-6}$  м;  
3 –  $T_3 = 299$  К,  $a_0 = 0,92 \cdot 10^{-6}$  м

рактерных для контактов из алюминиевых сплавов и меди, при этом аналогично [9] расчёт произведен при значениях:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $U = 0,5 \cdot 10^{-9}$  Дж,  $D_0 = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. Видно, что теория предсказывает резкое изменение переходного сопротивления через 10–15 мес после начала развития процесса окисления, которое, по нашему мнению, инициировано атмосферными перенапряжениями.

На основе данной модели нами произведён учёт влияния температуры контакта на коэффициент диффузии  $D(T)$ , а также влияние переходного сопротивления на превышение температуры контакта.

Температура стационарного нагрева контактного соединения по отношению к шине описывается соотношением, выведенным с учётом общих принципов термодинамики [6]:

$$T_{\text{к.с}} = T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = T_0 + I^2 \rho_{\text{ш}} / k_{\text{т.ш}} S_{\text{ш}} F_{\text{ш}} +$$

$$+ I^2 R_{\text{к}} / 2(k_{\text{т}} \lambda S_{\text{к}} F_{\text{ш}})^{1/2} + I^2 R_{\text{к}}^2 / 8 \lambda \rho_{\text{к}}, \quad (2)$$

где  $T_0$  – температура среды;  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $\Delta T_3$  – превышения температуры шины, зоны контакта и площади касания;  $I$  – ток;  $\rho_{\text{ш}}$ ,  $\rho_{\text{к}}$  – удельные электрические сопротивления шины и контакт-деталей;  $k_{\text{т.ш}}$ ,  $k_{\text{т}}$  – коэффициенты теплоотдачи шины и деталей;  $F_{\text{ш}}$  – площадь поперечного сечения шины;  $S_{\text{ш}}$ ,  $S_{\text{к}}$  – боковые поверхности единицы длины шины и КС;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности контакт-деталей;  $R_{\text{к}}$  – электрическое сопротивление КС.

С учетом соотношения (2) получаем, что превышение температуры КС над температурой окружающей среды и шиной

$$\Delta T_{\text{к.с}} = T_{\text{к.с}} - (T_0 + T_1) = \Delta T_2 + \Delta T_3 =$$

$$= I^2 R_{\text{к}} / 2(k_{\text{т}} \lambda S_{\text{к}} F_{\text{ш}})^{1/2} + I^2 R_{\text{к}}^2 / 8 \lambda \rho_{\text{к}}. \quad (3)$$

Расчеты показывают, что  $\Delta T_2 \gg \Delta T_3$ , поэтому для произвольной температуры  $T$  и момента времени  $t$  можно записать

$$\Delta T_{\text{к.с}}(t, T) = I^2 R_{\text{к}}(t, T) / 2(k_{\text{т}} \lambda S_{\text{к}} F_{\text{ш}})^{1/2} =$$

$$= I^2 R_{\text{к}}(t, T) f(\lambda, S_{\text{к}}, F_{\text{ш}}). \quad (4)$$

В начальный момент времени при  $t = 0$  и  $T = T_0$

$$\Delta T_{\text{к.с}}(0, T_0) = I^2 R_{\text{к}}(0, T_0) f(\lambda, S_{\text{к}}, F_{\text{ш}}). \quad (5)$$

В произвольный момент времени  $t$  при температуре контакта  $T$

$$\Delta T_{\text{к.с}}(t, T) / \Delta T_{\text{к.с}}(0, T_0) = R_{\text{к}}(t, T) / R_{\text{к}}(0, T_0). \quad (6)$$

С учетом диффузионного механизма старения контактного соединения из соотношения (1) по-

лучаем:

$$\Delta T_{к.с}(t, T) = \Delta T_{к.с}(0, T_0) / \{1 - [(2D(t, T)t)^{1/2} / a_0] \times \exp(-U / kT)\}. \quad (7)$$

Трансцендентное уравнение (1) решается приближённым способом методом итераций. На рис. 8 приведены расчетные данные для зависимости  $R_k(t, T) / R_k(0, T_0)$ , полученные по соотношению (1) без учёта влияния (кривая 1) и с учётом влияния температуры (кривая 2) на процесс диффузии по соотношению (6) при параметрах расчета:  $a_0 = 10^{-6}$  м;  $T_0 = 20$  °С;  $D_0 = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с;  $\Delta T_0 = 0,04$  °С. Видно, что учёт нагрева контакта, в том числе протекающим током, приводит к уменьшению срока службы контактного соединения.

Сравнение полученных расчётных данных (рис.8) с экспериментальными данными по превышению температуры КС на ВЧ-заградителях (рис.1, 2, 6) показывает, что их старение адекватно описывается диффузионными процессами роста диэлектрических плёнок.

В нормативных документах по тепловизионной диагностике предлагаются различные эмпирические сроки плановых обследований, а также практические критерии оценки технического состояния, сроки и категории ремонта того или иного соединения. Данные критерии, определенные на основе личного опыта экспертов, являются субъективными и не могут решить задачи, требуемые, например, ГОСТ 10432-82, где особо выделяются требования к надёжности: для оценки надёжности КС устанавливается *гамма-процентный ресурс*, нижнее значение которого должно обеспечить работу устройств в соответствии с требованиями стандартов.

Статистический анализ данных тепловизионной диагностики [3–5, 7, 8] позволяет выявить эксплуатационные параметры надёжности КС и

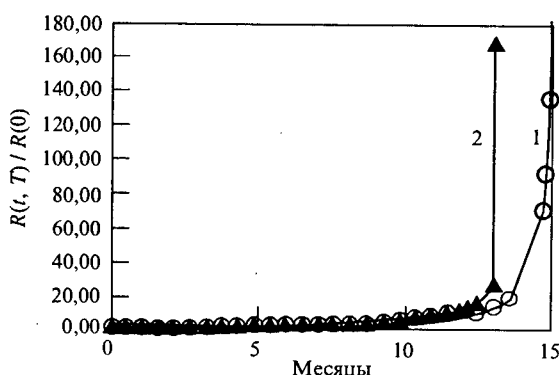


Рис.8. Расчётные значения  $R(t, T) / R(0)$  от времени старения (учёт нагрева)

их гамма-процентные показатели. Эти сведения дают возможность выявить причины возникновения дефектов, предсказать вероятность возникновения дефектных соединений в будущем.

В [8] показано, что для критических (аварийных) дефектов (ответственных за достижение критического состояния) 99,85 % гамма-процентная наработка составляет 12 мес. Это означает, что в течение года критические дефекты образуются с вероятностью безотказной работы 0,9985. Если во всей энергосистеме насчитывается 10 000 контактных соединений, то, например, при  $\omega_{кр} = 0,0015$  год<sup>-1</sup> через 1 год могут образоваться  $10000 \cdot 0,0015 = 15$  дефектных контактов, которые необходимо устранить в немедленном отключении оборудования. Для подстанции, насчитывающей, например, 400 контактных соединений, в течение 3 лет может образоваться не более 2 аварийных контактов.

Наиболее вероятной причиной образования дефектов являются местные грозы, создающие перенапряжения в высоковольтных линиях вблизи энергетического объекта [3, 4]. Проведенные нами расчеты показывают, что вероятность попадания молнии непосредственно в оборудование подстанции относительно низкая (не более одного раза в 3–5 лет). Дефекты контактных соединений высоковольтного оборудования образуются в среднем с частотой 0,7–2,1 в год на одном энергетическом объекте (станции, подстанции), при среднем значении 1,3 дефекта в течение года. Данная частота характерна для ударов молнии в протяженные объекты – линия электропередач длиной до 3–10 км (от подстанции). Этот вывод согласуется с результатами, полученными при исследовании влияния местных гроз на вероятность безотказной работы контактных соединений различных предприятий [3, 4]. Воздействие волн атмосферных перенапряжений, набегающих с линии электропередачи, несмотря на защиту подходов, в том числе вентильными разрядниками, является, по нашему мнению, причиной появления дефектов контактных соединений.

Обратим внимание на важное обстоятельство: на Кольском полуострове плотность ударов молнии в линии наименьшая – 1 км<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> [9], поэтому для энергетических систем, аналогичных "Колэнерго", следует ожидать значительно меньшие показатели надежности. Например, принимая среднее значение потока отказов  $\omega_{ср}$  для всех контактных соединений "Колэнерго" (Мурманская область) равным 0,01 год<sup>-1</sup> ( $R_{ср}^* = 0,99$ ), для критических (аварийных) –

$\omega_{кр} = 0,0015 \text{ год}^{-1}$  ( $R_{кр}^* = 0,99$ ) можно прогнозировать средние параметры надежности КС высоковольтного оборудования в различных регионах РФ (таблица).

**Параметры грозовой деятельности и прогнозируемые показатели надежности**

| Средняя продолжительность гроз, ч / год | Удельная плотность ударов молнии в землю $n$ , $1/\text{км}^2 \cdot \text{год}$ | Прогноз                  |                          |
|---|---|--------------------------|--------------------------|
|   |   | $\omega_{ср} / R_{ср}^*$ | $\omega_{кр} / R_{кр}^*$ |
| 10–20                                   | 1   | 0,01 / 0,99              | 0,0015/0,9985            |
| 20–40                                   | 2   | 0,02 / 0,98              | 0,003 / 0,997            |
| 40–60                                   | 4   | 0,04 / 0,96              | 0,005 / 0,995            |
| 60–80                                   | 5,5   | 0,06 / 0,94              | 0,006 / 0,994            |
| 80–100                                  | 7   | 0,07 / < 0,93            | 0,007 / 0,993            |
| 100 и более                             | 8,5   | > 0,8 / < 0,92           | 0,009 / 0,991            |

Следует отметить, что, несмотря на требования ГОСТ 10432-82, в нормативных документах отсутствуют "нижнее значение гамма-процентного ресурса" и другие подобные показатели КС высоковольтного оборудования. В настоящее время невозможно указать, какое количество предполагаемых новых дефектов является допустимым с точки зрения безопасности и надежности, и, соответственно, рекомендовать оптимальные научно-обоснованные сроки планового тепловизионного обследования.

Необходимо внедрение системы статистической обработки данных тепловизионного контроля на предприятиях отрасли с целью определения показателей надежности по энергосистемам и отдельным объектам. На основе единой методики статистической обработки данных тепловизионного контроля можно сравнить существующие показатели надежности энергосистем с целью определения единых требований по показателям надежности и предельным значениям показателей надежности контактных соединений высоковольтного оборудования. В конечном счете должны быть разработаны требова-

ния по нижнему значению гамма-процентного ресурса контактных соединений оборудования (по ГОСТ 10432-82), и на этой основе определены научно-обоснованные сроки ремонтов, плановых и внеплановых обследований.

Автор благодарит начальника ЦВЛ "Колэнерго" Джуру А.В. за помощь в подготовке данных.

**Список литературы**

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. ГОСТ 10434-82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования.
3. Власов А.Б. Расчет эксплуатационных показателей надежности контактных соединений с помощью тепловизионного контроля // Электротехника. 2002. № 8. С.30–35.
4. Власов А.Б. Факторный анализ показателей надежности контактных соединений по данным тепловизионного контроля // Электротехника. 2003. № 4. С.51–55.
5. Власов А.Б. Обработка и анализ данных тепловизионного контроля электрооборудования // Электротехника. 2002. № 7. С.37–43.
6. Дзекцер Н.Н., Висленев Ю.С. Многоамперные контактные соединения. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1987.
7. Власов А.Б., Джура А.В. Оценка параметров надежности контактных соединений по данным тепловизионного контроля // Электротехника. 2002. № 6. С.2–5.
8. Власов А.Б. Определение гамма-процентного ресурса контактных соединений по данным тепловизионной диагностики // Электротехника. 2003. № 8. С.25–28.
9. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД34.21.122-87. М.: Энергоатомиздат, 1989.



**Власов Анатолий Борисович** – профессор кафедры электрооборудования судов Мурманского ГТУ. Окончил Ленинградский государственный университет в 1973 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Старение неполярных полимерных диэлектриков при одновременном воздействии переменного электрического напряжения и электролитов" в 1980 г.

**Вниманию руководителей  
предприятий, объединений, НИИ и КБ, вузов  
Редакция журнала "Электротехника"**

**предлагает услуги**

по подготовке и выпуску на договорных условиях специальных (тематических) номеров журнала "Электротехника" по тематике и материалам (в том числе и рекламным) заказчика.

**Справки по телефону: 361-95-96**

## Оптимальное по быстродействию векторное регулирование статорного тока в частотно-управляемых асинхронных электроприводах с широтно-импульсной модуляцией

ВОЛКОВ А.В.

*Получены аналитические зависимости для оптимального по быстродействию векторного регулирования статорного тока в частотно-управляемых асинхронных электроприводах с ШИМ, учитывающие влияние электромагнитных процессов в двигателе и фактическую несинусоидальную форму выходного напряжения преобразователей частоты. Предложены алгоритмы реализации рассмотренного оптимального регулирования в асинхронных электроприводах с трехфазными преобразователями частоты с ШИМ на основе автономного инвертора напряжения и непосредственного преобразователя частоты.*

*Analytic dependences for a quick-operating vector control by a stator current in adjustable -frequency asynchronous electric drives with a pulse - width modulation (PWM) are obtained; which take into account an influence of electromagnetic processes in a motor and frequency converter's actual nonsinusoidal output voltage form. Algorithms to realize the considered optimuni control in asynchronous electric drives with three - phase frequency converters with PWM on the basis of autonomous voltage inverter and direct frequency converter are proposed.*

С промышленным освоением на базе высокочастотных силовых транзисторов (MOSFET, IGBT) и запираемых тиристоров (GTO, IGCT) экономичных и надежных в эксплуатации преобразователей частоты с ШИМ стала чрезвычайно актуальной задача качественного регулирования электроприводов переменного тока с этими преобразователями: автономным инвертором напряжения (АИН-ШИМ) и непосредственным преобразователем частоты (НПЧ-ШИМ) на полностью управляемых силовых ключах (последний преобразователь получил за рубежом название "матричного"). Несмотря на то, что в теории и практике создания высококачественных (векторного типа) систем регулирования асинхронных электроприводов с АИН-ШИМ уже достигнуты определенные успехи и накоплен значительный опыт [1,2], до сих пор продолжает оставаться актуальным и востребованным практикой повышение быстродействия регулирования указанных электроприводов (для электроприводов с НПЧ-ШИМ это еще в большей степени актуально, поскольку последние находятся вообще пока в стадии первоначального исследования, создания и применения).

Предложенная статья рассматривает оптимальное (под которым будем далее понимать предельное теоретически возможное по быстродействию) векторное регулирование статорного тока в асинхронных электроприводах с АИН-ШИМ и НПЧ-ШИМ, достигаемое с учетом протекающих электромагнитных процессов в дви-

гателе и фактической несинусоидальной формы выходных напряжений преобразователей частоты с ШИМ.

Для мощностей асинхронных двигателей (АД) свыше 3 кВт при питании от рассматриваемых типов преобразователей с высокочастотной ШИМ (с частотой переключения силовых ключей не менее 3 кГц) электромагнитные процессы на произвольном  $n$ -м интервале времени  $0 \leq t' < \tau_n$  между соседними коммутациями силовых ключей (далее называемом "межкоммутационным интервалом") описываются (аппроксимируются) следующими зависимостями [3]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}(t') &= \bar{I}(0) + \Delta \bar{I}(t'); \\ \Delta \bar{I}(t') &\approx t' \Delta \bar{U}(0) / L_{\sigma}; \\ \Delta \bar{U}(0) &= \bar{U}(0) - k \bar{E}(0) - R_s \bar{I}(0) \approx \bar{U}(0) - k \bar{E}(0), \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\bar{I}(0)$  и  $\Delta \bar{I}(t')$  – соответственно начальное значение (при  $t' = 0$ ) и приращение обобщенного вектора статорного тока на межкоммутационном интервале;  $\bar{U}(0)$  и  $\bar{E}(0)$  – начальные значения (при  $t' = 0$ ) обобщенных векторов соответственно выходного напряжения преобразователя и ЭДС ротора двигателя;  $\Delta \bar{U}(0)$  – результирующий обобщенный вектор напряжения;  $L_{\sigma}$  – суммарная индуктивность рассеяния двигателя;  $R_s$  и  $k$  – соответственно активное сопротивление статора и коэффициент связи ротора АД;  $\tau_n$  – длительность  $n$ -го межкоммутационного интервала.

Здесь и далее используется запись всех переменных и параметров АД в общепринятой для машин переменного тока системе относительных единиц [4], а также принимается идеализированное представление трехфазного короткозамкнутого АД (с соединением статорных обмоток в "звезду" без нулевого провода). В системе (2) все обобщенные векторы описаны в неподвижной относительно статора полярной координатной системе (с отсчетом аргументов векторов от неподвижной оси  $\alpha$ , совпадающей с магнитной осью обмотки фазы  $a$  статора двигателя).

Зависимости (1) характеризуются следующими особенностями. Во-первых, принимаются неизменными: значения обобщенных векторов выходного напряжения преобразователя и ЭДС ротора АД и результирующего вектора напряжения на протяжении каждого из межкоммутационных интервалов ( $\bar{U}(0) = \bar{E}(0) = \Delta\bar{U}(0) = \text{const}$ ). Во-вторых, направления (параллельны между собой) обобщенных векторов результирующего напряжения  $\Delta\bar{U}(0)$  и приращения статорного тока  $\Delta\bar{I}(t')$  совпадают. В-третьих, зависимость амплитуды  $\Delta I$  обобщенного вектора приращения статорного тока  $\Delta\bar{I}(t')$  от амплитуды  $\Delta U$  результирующего обобщенного вектора напряжения  $\Delta\bar{U}(0)$  и от текущего значения времени  $t'$  (рассчитываемого от начала и на протяжении рассматриваемого межкоммутационного интервала) прямо пропорциональная.

В зависимости от сочетания открытых и закрытых состояний силовых ключей преобразователя обобщенный вектор выходного напряжения преобразователей с ШИМ принимает на межкоммутационном интервале одно ( $\bar{U}_m = U_m e^{j\theta_m}$ ) из  $m$  ( $1 \leq m \leq N$  – натуральное число) своих возможных значений, в соответствии с [3],  $m$  – условный номер обозначения создаваемого вектора, а  $U_m$  и  $\theta_m$  – модуль и аргумент этого вектора (значения последних рассчитаны в [3] при условии представления силовых ключей идеальными). И, в частности, на выходе трехфазного АИН-ШИМ возможно создание всего  $N = 7$  различных значений обобщенного вектора выходного напряжения, а на выходе трехфазного НПЧ-ШИМ – уже  $N = 25$  различных значений [3]. С учетом последнего равенства из (2) в асинхронном электроприводе с АИН-ШИМ аналогично возможно создание всего  $N = 7$  различных (соответствующих обобщенным векторам

$\bar{U}_m$  выходного напряжения преобразователя) значений результирующего обобщенного вектора напряжения  $\Delta\bar{U}_m(0)$ , а для НПЧ-ШИМ – уже  $N = 25$  различных между собой соответствующих значений вектора  $\Delta\bar{U}_m(0)$ .

Рассмотрим оптимальное (здесь и далее по критерию максимального быстродействия) векторное регулирование статорного тока в асинхронных электроприводах с АИН-ШИМ и НПЧ-ШИМ для широко применяемого на практике закона частотного управления АД – при постоянстве модуля  $\Psi = \text{const}$  обобщенного вектора  $\bar{\Psi}$  потокосцепления ротора [4,5]. Оптимальное регулирование, очевидно, характеризуется минимально возможным временем отработки заданного нового значения  $\bar{I}^*$  обобщенного вектора статорного тока АД (из начального положения  $\bar{I}$ ). Исходя из принятого закона частотного управления, по окончании процесса отработки нового значения  $\bar{I}^*$  обобщенного вектора статорного тока его проекции (на оси вращающейся ортогональной координатной системы  $x$ – $y$  (рис.1), связанной осью  $x$  с обобщенным вектором потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}$  АД) получают следующие приращения:  $\Delta I_y$  – для активной проекции  $I_y$  и  $\Delta I_x = 0$  – для намагничивающей проекции  $I_x$ .

Так как используется высокочастотная ШИМ, обобщенные векторы потокосцепления  $\bar{\Psi}$  и ЭДС  $\bar{E}$  ротора практически совпадают с соответствующими обобщенными векторами  $\bar{\Psi}_1$  и  $\bar{E}_1$  от действия основных (первых) гармонических составляющих рассматриваемых сигналов [3]. Векторы  $\bar{\Psi}$  и  $\bar{E}$  между собой еще и ортогональны, совпадая с осями  $x$  и  $y$  вращающейся координатной системы соответственно.

Для самого общего случая (с участием всех возможных создаваемых значений обобщенных векторов выходного напряжения  $\bar{U}_m(0)$  преобразователя с ШИМ) процесс отработки нового заданного значения  $\bar{I}^*$  обобщенного вектора статорного тока АД математически описывается в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{1y}t_1 + \Delta U_{2y}t_2 + \dots + \Delta U_{my}t_m + \dots + \\ + \Delta U_{Ny}t_N = L_\sigma \Delta I_y; \\ \Delta U_{1x}t_1 + \Delta U_{2x}t_2 + \dots + \Delta U_{mx}t_m + \dots + \\ + \Delta U_{Nx}t_N = 0; \\ t_1 + t_2 + \dots + t_m + \dots + t_N = t_\Sigma, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

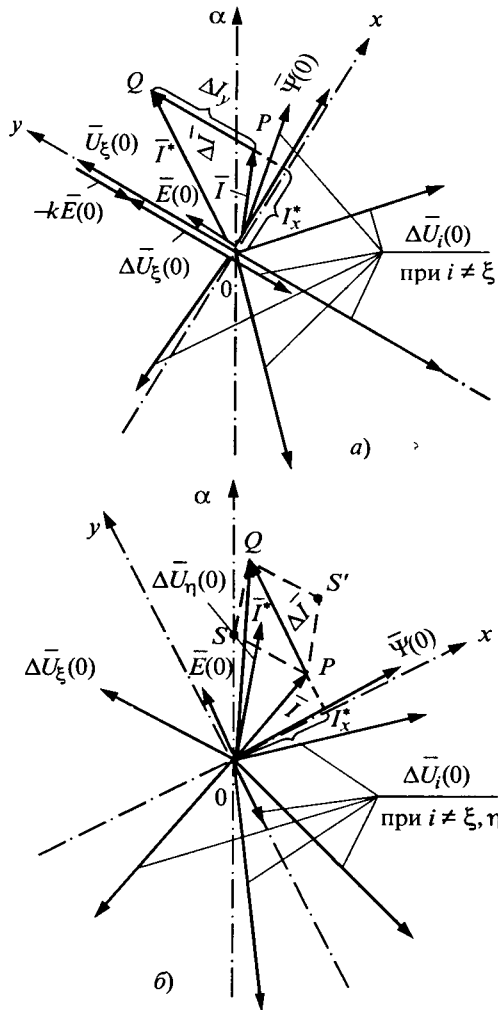


Рис.1. Векторные диаграммы для оптимального векторного регулирования статорного тока:

а – частный случай; б – общий случай

где  $\Delta U_{mx}$  и  $\Delta U_{my}$  – проекции на оси  $x$  и  $y$  результирующего обобщенного вектора напряжения  $\Delta \bar{U}_m(0)$ , рассчитываемые в начале каждого межкоммутационного интервала (при  $t' = 0$ ) и для каждого  $m$ -го значения всех  $N$  возможных по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{U}_m(0) &= \bar{U}_m(0) - k\bar{E}(0); & \Delta U_{mx} &= U_{mx}(0); \\ \Delta U_{my} &= U_{my}(0) - k\bar{E}(0); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$t_m$  – длительность времени формирования  $m$ -го значения обобщенного вектора  $\bar{U}_m(0)$  выходного напряжения преобразователя;  $t_\Sigma$  – общее (суммарное) время отработки заданного нового значения вектора статорного тока.

Очевидно рассматриваемое оптимальное регулирование статорного тока характеризуется минимально возможным значением общего времени отработки:  $t_\Sigma = t_{\Sigma 0} = \min$ , а математически

поиск оптимального значения времени отработки  $t_{\Sigma 0}$ , по-существу, сводится к решению задачи линейного программирования – с нахождением минимального значения линейного вида целевой функции, представленной последним уравнением системы (2), и соответствующих ей оптимальных значений переменных (временных длительностей) [6]:  $t_{10}, t_{20}, \dots, t_{N0} \geq 0$ .

Перейдя к относительным значениям длительностей:

$$\lambda_1 = \frac{t_1}{t_\Sigma}; \quad \lambda_2 = \frac{t_2}{t_\Sigma}; \quad \dots \quad \lambda_m = \frac{t_m}{t_\Sigma}; \quad \dots \quad \lambda_N = \frac{t_N}{t_\Sigma}, \quad (4)$$

где

$$\sum_{i=1}^N \lambda_m = 1; \quad 0 \leq \lambda_m \leq 1,$$

преобразуем (2) к виду:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{1y} \lambda_1 + \Delta U_{2y} \lambda_2 + \dots + \Delta U_{my} \lambda_m + \dots + \\ + \Delta U_{Ny} \lambda_N &= L_\sigma \Delta I_y / t_\Sigma; \\ \Delta U_{1x} \lambda_1 + \Delta U_{2x} \lambda_2 + \dots + \Delta U_{mx} \lambda_m + \dots + \\ + \Delta U_{Nx} \lambda_N &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Далее нахождение оптимального алгоритма регулирования статорного тока сводится к поиску экстремального значения правой части первого уравнения из (5):

$$\frac{L_\sigma \Delta I_y}{t_\Sigma} = \begin{cases} \max & \text{при } \Delta I_y > 0; \\ \min & \text{при } \Delta I_y < 0, \end{cases} \quad (6)$$

и соответствующих ему оптимальных относительных значений длительностей:  $\lambda_{m0}$ , где  $m = 1, 2, \dots, N$ .

Анализ системы (5) свидетельствует, что экстремальное значение из (6) достигается при выполнении следующих двух условий:

– для максимально возможных значений относительных длительностей ( $\lambda_{\xi 0}, \lambda_{\eta 0}$ ) при наибольших (по модулю) одном ( $\Delta U_{\xi y}$ ) или двух ( $\Delta U_{\xi y}, \Delta U_{\eta y}$ ) из весовых коэффициентов в первом уравнении из (5), совпадающих по знаку с приращением  $\Delta I_y$  активной проекции вектора статорного тока:

$$\left. \begin{aligned} \text{sign}(\Delta U_{\xi y}) &= \text{sign}(\Delta U_{\eta y}) = \text{sign}(\Delta I_y); \\ \lambda_{\xi 0}, \lambda_{\eta 0} &\geq \lambda_i; \quad |\Delta U_{\xi y}|, |\Delta U_{\eta y}| \geq |\Delta U_{iy}|, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $i \neq \xi, \eta$ ;

– при одновременном равенстве нулю всех остальных значений относительных длительностей:

$$\lambda_{i0} = 0, \quad (8)$$

где  $i \neq \xi, \eta$ , соответствующих всем остальным весовым коэффициентам ( $\Delta U_{iy}$ ) в первом уравнении из (5). Таким образом, условие (8) выполняется тогда, когда весовые коэффициенты  $\Delta U_{iy}$  не совпадают по знаку с приращением  $\Delta I_y$  активной проекции статорного тока:

$$\text{sign}(\Delta U_{iy}) = -\text{sign}(\Delta I_y), \quad (9)$$

либо, совпадая по знаку с проекцией  $\Delta I_y$ , не максимальны по модулю (абсолютному значению):

$$\left. \begin{aligned} \text{sign}(\Delta U_{iy}) &= \text{sign}(\Delta I_y); \\ |\Delta U_{iy}| &< |\Delta U_{\xi y}|, |\Delta U_{\eta y}|, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где  $\xi, \eta, i$  – индексы (натуральные числа от 1 до  $N$ ), численно равные одному из значений  $m$  создаваемых результирующих обобщенных векторов напряжения (в принятой из [3] нумерации участвующих при этом обобщенных векторов выходного напряжения преобразователей с ШИМ).

В свою очередь, первое из рассмотренных условий может практически осуществляться в двух вариантах. Во-первых (наиболее редкий по вероятности частный случай), если существует такое значение обобщенного вектора выходного напряжения  $\bar{U}_{\xi}(0)$  преобразователя с ШИМ, при котором возможно создание результирующего обобщенного вектора напряжения  $\Delta \bar{U}_{\xi}(0)$  из (4), идеально совпадающего по направлению (параллельного) с вектором приращения  $\Delta \bar{I} = (\bar{I}^* - \bar{I})$  статорного тока двигателя (рис.1,а). В этом случае оптимальное регулирование тока осуществляется созданием (в течение времени  $t_{\xi 0}$ ) единственного значения вектора выходного напряжения  $\bar{U}_{\xi}(0)$  преобразователя, для которого с учетом (2), (4)–(6) выполняются следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{\xi x} &= 0; \quad \Delta U_{\xi y} = \Delta U_{\xi}(0); \\ \lambda_{\xi 0} &= 1; \quad \lambda_{i0} = 0 \quad \text{при } i \neq \xi; \\ t_{\Sigma 0} &= t_{\xi 0} = L_{\sigma} \Delta I_y / \Delta U_{\xi}(0), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $\Delta U_{\xi x}$ ,  $\Delta U_{\xi y}$ ,  $\Delta U_{\xi}(0)$  – соответственно проекции (на оси  $x$  и  $y$ ) и модуль результирующего обобщенного вектора напряжения  $\Delta \bar{U}_{\xi}(0)$ ; индексом "0" здесь и далее обозначаются оптимальные значения переменных. На временной диаграмме (рис.1,а) рассмотренному варианту (частному случаю) соответствует годограф движения конца обобщенного вектора статор-

ного тока вдоль отрезка прямой  $PQ$ , а весь процесс оптимального регулирования вектора статорного тока осуществляется, очевидно, за один межкоммутационный интервал с длительностью, равной общему времени  $t_{\Sigma 0}$  отработки.

Во втором варианте (наиболее часто по вероятности встречающемся на практике, т.е. для более общего случая) отсутствует значение обобщенного вектора выходного напряжения преобразователя, обеспечивающего параллельность между собой обобщенных векторов результирующего напряжения  $\Delta \bar{U}_{\xi}(0)$  и приращения статорного тока  $\Delta \bar{I}$ . В этом варианте для осуществления оптимальной отработки статорного тока АД используются два значения  $\bar{U}_{\xi}(0)$  и  $\bar{U}_{\eta}(0)$  обобщенного вектора выходного напряжения преобразователя с ШИМ, которые создают соответственно результирующие обобщенные векторы напряжения  $\Delta \bar{U}_{\xi}(0)$  и  $\Delta \bar{U}_{\eta}(0)$ , отвечающие условиям (7). Кроме того, данные векторы  $\Delta \bar{U}_{\xi}(0)$  и  $\Delta \bar{U}_{\eta}(0)$  характеризуются непременно разными (противоположными) знаками проекций  $\Delta U_{\xi x}$ ,  $\Delta U_{\eta x}$  на ось  $x$  вращающейся координатной системы  $x$ – $y$  (необходимость последнего, очевидно, следует из второго уравнения системы (5) с учетом (8)).

Принимая во внимание изложенное, из формул (2), (4)–(8) получим следующие соотношения для оптимального регулирования тока в последнем (общем) варианте:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\xi 0} &= \frac{\Delta U_{\eta x}}{\Delta U_{\eta x} - \Delta U_{\xi x}}; \quad \lambda_{\eta 0} = \frac{\Delta U_{\xi x}}{\Delta U_{\xi x} - \Delta U_{\eta x}}; \\ t_{\Sigma 0} &= L_{\sigma} \Delta I_y (\Delta U_{\eta x} - \Delta U_{\xi x}) / (\Delta U_{\eta x} \Delta U_{\xi y} - \Delta U_{\xi x} \Delta U_{\eta y}); \\ t_{\xi 0} &= \lambda_{\xi 0} t_{\Sigma 0} = L_{\sigma} \Delta I_y \Delta U_{\eta x} / (\Delta U_{\eta x} \Delta U_{\xi y} - \Delta U_{\xi x} \Delta U_{\eta y}); \\ t_{\eta 0} &= \lambda_{\eta 0} t_{\Sigma 0} = L_{\sigma} \Delta I_y \Delta U_{\xi x} / (\Delta U_{\xi x} \Delta U_{\eta y} - \Delta U_{\eta x} \Delta U_{\xi y}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

в котором годограф движения конца обобщенного вектора статорного тока (рис.1,б) представляет ломаную (состоящую из двух отрезков прямых) линию  $PSQ$ . Для данного варианта оптимальное регулирование вектора статорного тока осуществляется за два межкоммутационных интервала:  $t_{\xi 0}$  (отрезок прямой  $PS$ ) – с участием результирующего вектора напряжения  $\Delta \bar{U}_{\xi}(0)$  и  $t_{\eta 0}$  (отрезок прямой  $SQ$ ) – с участием результирующего вектора напряжения  $\Delta \bar{U}_{\eta}(0)$ .

Из сравнения между собой годографов  $PQ$  и  $PSQ$  (рис.1) следует, что для последнего общего (в отличие от первого частного) опти-

мального варианта регулирования тока характерно наличие ненулевого текущего отклонения  $\Delta I_x = I_x^* - I_x \neq 0$  между заданным  $I_x^* = \text{const}$  (из условия принятого закона управления  $\Psi = \text{const}$ ) и фактическим  $I_x$  значениями намагничивающей проекции вектора статорного тока. В зависимости от очередности формирования во времени результирующих векторов напряжения  $\Delta \bar{U}_\xi(0)$  и  $\Delta \bar{U}_\eta(0)$   $\Delta I_x$  может быть как отрицательным (при годографе  $PSQ$ , соответствующем первоначальному формированию результирующего вектора  $\Delta \bar{U}_\xi(0)$ , а последующего —  $\Delta \bar{U}_\eta(0)$ , так и положительным (при годографе  $PS'Q$ , соответствующем другой очередности во времени формирования этих же векторов). Для рассмотренных траекторий годографов ( $PSQ$  или  $PS'Q$ ) при больших значениях приращений  $\Delta I_y$  активной проекции вектора статорного тока может наблюдаться существенное (по амплитуде) текущее отклонение  $\Delta I_x$  намагничивающей проекции  $I_x$  статорного тока, что вызывает соответствующее значительное (в сторону увеличения или уменьшения) отклонение среднего значения последней проекции  $I_x$  (на интервале отработки  $t_{\Sigma 0}$ ) от ее заданного значения  $I_x^*$ . Как следствие, это приводит к изменению (отклонению от заданного неизменного значения  $\Psi^*$ ) текущего модуля  $\Psi$  вектора потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}$  АД и к ухудшению динамики электропривода в целом.

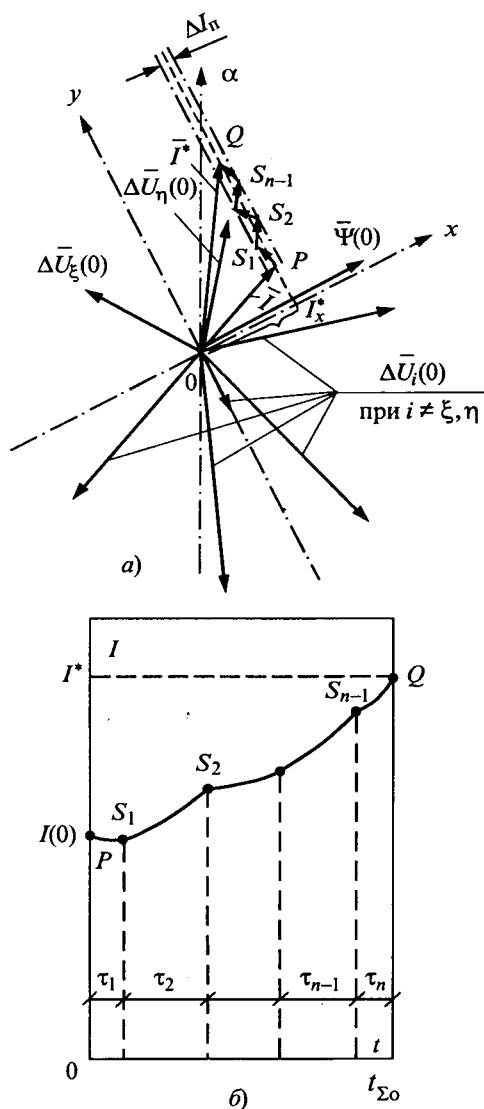
Указанное воздействие на модуль  $\Psi$  потоко-  
цепления АД можно уменьшить, усовершенство-  
вав определенным образом рассмотренное ра-  
нее оптимальное управление на базе второго  
варианта: используя те же самые два значения  
 $\Delta \bar{U}_{\xi}(0)$  и  $\Delta \bar{U}_{\eta}(0)$  результирующих обобщенных  
векторов напряжения из (7) и, во-первых, фор-  
мировать их поочередно и многократно (т.е. в  
течение не двух, а в несколько или много раз  
большого числа  $n$ , межкоммутационных интер-  
валов) на протяжении общего времени  $t_{\Sigma 0}$  отра-  
ботки, а во-вторых, значительно сократив при  
этом (воздействием на дополнительное увеличе-  
ние частоты переключения силовых ключей пре-  
образователя) временные длительности каждо-  
го из полученных межкоммутационных интер-  
валов, но сохранив равными оптимальным  
значениям  $t_{\Sigma 0}$ ,  $t_{\xi 0}$  и  $t_{\eta 0}$  из (12) общее время отра-  
ботки и суммы временных длительностей фор-  
мирования каждого из соответствующих резуль-

тирующих векторов  $\Delta \bar{U}_\xi(0)$  и  $\Delta \bar{U}_\eta(0)$ .

Влияние текущего отклонения  $\Delta I_x$  намагничивающей проекции статорного тока на потокосцепление ротора можно практически полностью исключить (свести к нулю), реализовав предложенное усовершенствованное оптимальное регулирование тока на базе релейного управления текущим значением  $I_x$  намагничивающей проекции вектора статорного тока в симметричной токовой "трубке" (с шириной  $\Delta I_n$ ) со следующими пределами:

$$I_{\text{y}}^* - \Delta I_{\text{y}}/2 \leq I_{\text{y}} \leq I_{\text{y}}^* + \Delta I_{\text{y}}/2. \quad (13)$$

При данном управлении (иллюстрируемом годографом  $P, S_1, S_2, \dots, S_{n-1}, Q$  на рис.2,а и временной диаграммой отработки модуля  $I$  обоб-

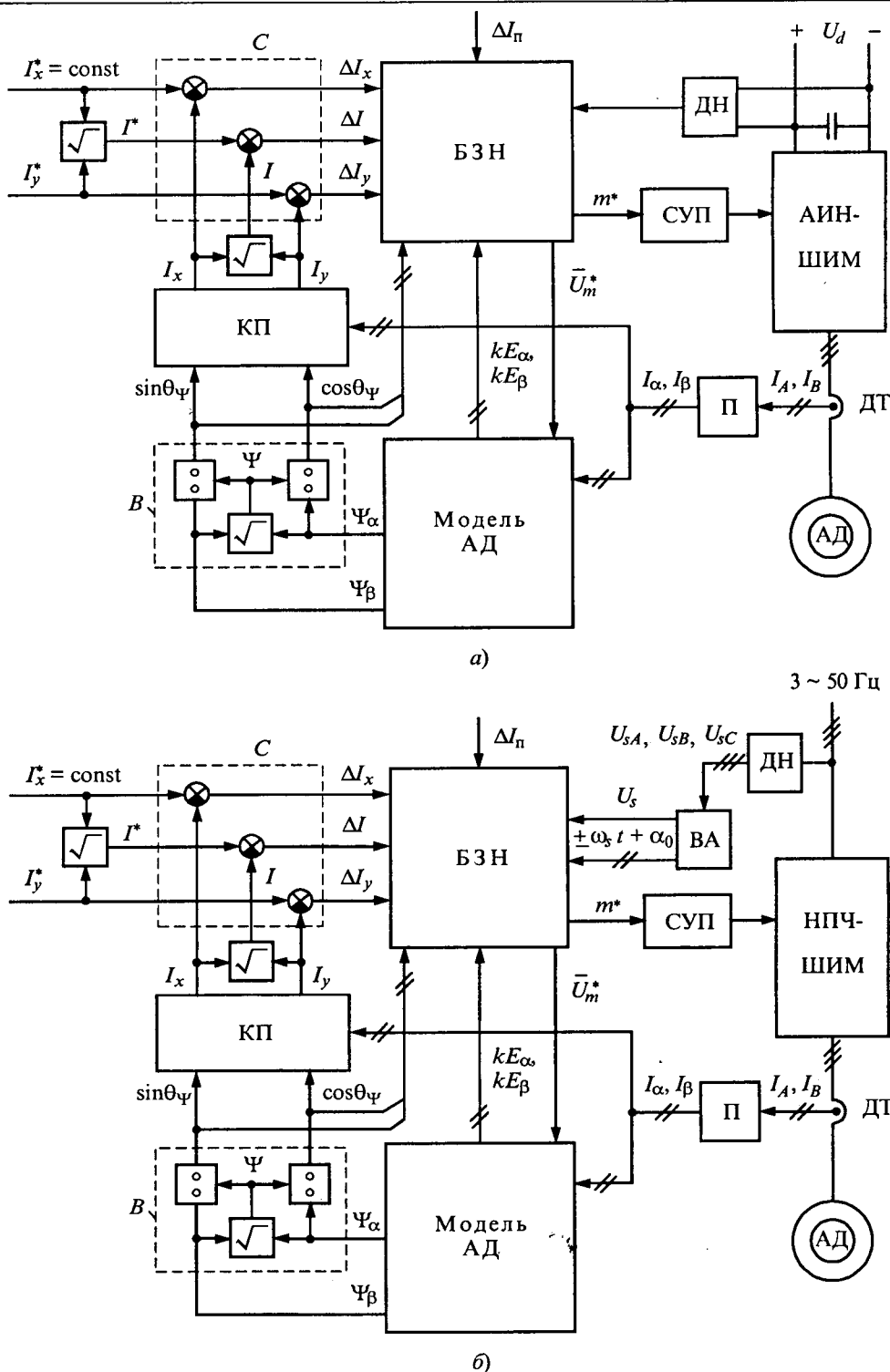


**Рис.2.** Диаграммы для усовершенствованного оптимального векторного регулирования статорного тока:  
*а* – векторная диаграмма; *б* – временная диаграмма отработки модуля вектора статорного тока



щенного вектора статорного тока на рис.2,б) на протяжении общего времени  $t_{\Sigma 0}$  отработки тока равно нулю среднее значение текущего отклонения  $\Delta I_x$  намагничивающей составляющей статорного тока, а среднее значение указанной составляющей  $I_x$  статорного тока и текущее значение  $\Psi$  модуля потокосцепления ротора АД поддерживаются неизменными – равными их соответствующим заданным значениям  $I_x^*$  и  $\Psi^*$ . Очевидно, от ширины  $\Delta I_{\Pi}$  токовой "трубки" зависят: прямо пропорционально – амплитуда текущего отклонения  $\Delta I_x$  намагничивающей составляющей тока и примерно обратно пропорционально – количество  $n$  межкоммутационных интервалов в течение общего времени  $t_{\Sigma 0}$  отработки тока.

На основе предыдущего анализа автором предложены алгоритмы оптимального по быстродействию векторного регулирования статорного тока АД, иллюстрируемые функциональными схемами на рис.3 для электроприводов: с АИН-ШИМ (а) и НПЧ-ШИМ (б). В силовых цепях электроприводов измеряются фазные статорные токи  $I_A$ ,  $I_B$  двигателя (датчиками тока ДТ), входное напряжение  $U_d$  инвертора для АИН-ШИМ или фазные напряжения  $U_{sA}$ ,  $U_{sB}$ ,  $U_{sC}$  питающей сети для НПЧ-ШИМ (датчиками напряжения ДН), информация о которых используется для функционирования регулирующей части электроприводов и модели АД. С помощью модели АД вычисляются текущие значения ортогональных



**Рис.3.** Функциональные схемы асинхронных электроприводов с оптимальным векторным регулированием статорного тока:  
*a* – с АИН–ШИМ; *б* – с НПЧ–ШИМ

проекций  $\Psi_\alpha$ ,  $\Psi_\beta$  обобщенного вектора потокосцепления ротора  $\overline{\Psi}(t)$  и ортогональных проекций  $kE_\alpha$ ,  $kE_\beta$  обобщенного приведенного (к статору) вектора ЭДС ротора  $k\overline{E}(t)$  на оси неподвижной относительно статора двигателя ортогональной координатной системы  $\alpha$ - $\beta$ . Посредством звеньев преобразования  $\Pi$  определяются

текущие значения  $I_\alpha$ ,  $I_\beta$  проекций обобщенного вектора статорного тока  $\bar{I}(t)$  на оси неподвижной координатной системы  $\alpha$ - $\beta$  [5]:

$$I_\alpha = I_A; \quad I_\beta = (I_A + 2I_B)/\sqrt{3}. \quad (14)$$

Через проекции  $\Psi_\alpha$ ,  $\Psi_\beta$  обобщенного вектора потокосцепления вычислитель  $B$  рассчитывает модуль  $\Psi$  вектора потокосцепления и гармонические функции  $\sin \theta_\Psi$ ,  $\cos \theta_\Psi$  от аргумента  $\theta_\Psi$  обобщенного вектора потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}(t)$  [7] (блок  $\sqrt{\phantom{x}}$  на рис.3,а,б обозначает математическую операцию выделения корня квадратного из суммы квадратов его входных сигналов). Посредством координатного преобразователя КП находятся проекции  $I_x$ ,  $I_y$  обобщенного вектора статорного тока  $\bar{I}(t)$  АД на оси ортогональной вращающейся (связанной осью  $x$  с вектором потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}$ ) координатной системы  $x$ - $y$ :

$$\left. \begin{aligned} I_x &= I_\alpha \cos \theta_\Psi + I_\beta \sin \theta_\Psi; \\ I_y &= -I_\alpha \sin \theta_\Psi + I_\beta \cos \theta_\Psi. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Посредством сумматоров  $C$  вычисляются отклонения между заданными и фактическими значениями для модуля  $\Delta I$ , намагничивающей  $\Delta I_x$  и активной  $\Delta I_y$  проекций обобщенного вектора статорного тока:

$$\Delta I = I^* - I; \quad \Delta I_x = I_x^* - I_x; \quad \Delta I_y = I_y^* - I_y, \quad (16)$$

поступающие на вход блока задания напряжения  $BZH$ . Для электропривода с НПЧ-ШИМ посредством векторного анализатора ( $BA$ ) через входные сигналы  $U_{sA}$ ,  $U_{sB}$ ,  $U_{sC}$  определяются текущие значения модуля  $U_s$  и аргументов  $(\omega_s t + \alpha_0)$  и  $(-\omega_s t + \alpha_0)$  вращающихся базовых обобщенных векторов напряжения питающей сети соответственно прямой и обратной последовательности [3,5]:

$$\left. \begin{aligned} U_s &= [2(U_{sA}^2 + U_{sB}^2 + U_{sC}^2)/3]^{-1/2}; \\ (\pm \omega_s t + \alpha_0) &= \pm \arcsin[(U_{sB} - U_{sC})/\sqrt{3} U_s] + \\ &+ \frac{\pi}{2} [1 - \text{sign}(U_{sA})]. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

В блоке задания напряжения  $BZH$  осуществляется сравнение значений поступающих отклонений  $\Delta I$ ,  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  с пределами  $\pm \Delta I_n/2$  токовой "трубки". Если отклонение по активной проекции  $\Delta I_y$  статорного тока "выходит" за пределы "трубки":

$$|\Delta I_y| > \Delta I_n/2, \quad (18)$$

то в блоке  $BZH$  рассчитываются все возможные значения  $(1 \leq m \leq N)$  обобщенных векторов напряжения  $\bar{U}_m(0)$  на выходе преобразователей [3], их проекции  $U_{mx}$ ,  $U_{my}$  на оси вращающейся ортогональной координатной системы  $x$ - $y$ :

$$\left. \begin{aligned} U_{mx} &= U_{m\alpha} \cos \theta_\Psi + U_{m\beta} \sin \theta_\Psi; \\ U_{my} &= -U_{m\alpha} \sin \theta_\Psi + U_{m\beta} \cos \theta_\Psi; \\ U_{m\alpha} &= U_m(0) \cos \theta_m(0); \\ U_{m\beta} &= U_m(0) \sin \theta_m(0), \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

а также соответствующие результирующие обобщенные векторы напряжения  $\Delta \bar{U}_m$  и их проекции  $\Delta U_{mx}$ ,  $\Delta U_{my}$  согласно (3), где  $U_m(0)$  и  $\theta_m(0)$  – значения модуля и аргумента обобщенного вектора  $\bar{U}_m(\theta)$  в рассматриваемый момент времени ( $t' = \theta$ ). Из полученных рассчитанных значений выбирается такое (оптимальное в данный момент времени) с номером  $m = m^*$  значение  $\bar{U}_m^*$  обобщенного вектора выходного напряжения, при котором создается наибольшее возможное значение модуля проекции  $|\Delta U_{my}^*|$  результирующего обобщенного вектора напряжения, а знаки проекций  $\Delta U_{mx}$ ,  $\Delta U_{my}$  последнего совпадают с соответствующими знаками отклонений намагничивающей  $\Delta I_x$  и активной  $\Delta I_y$  проекций вектора статорного тока:

$$\left. \begin{aligned} |\Delta U_{my}^*| &= \max; \quad \text{sign}(\Delta U_{mx}) = \text{sign}(\Delta I_x); \\ \text{sign}(\Delta U_{my}) &= \text{sign}(\Delta I_y) \quad \text{при } m = m^*. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

В соответствии с указанным значением  $m^*$ , поступающим на вход системы управления преобразователем  $CУП$ , включаются определенные силовые ключи преобразователей частоты (формирующие обобщенный вектор  $\bar{U}_m^*$  напряжения на выходе), в результате чего реализуется усовершенствованное оптимальное по быстродействию векторное регулирование (в описываемой по (13) токовой "трубке") статорного тока двигателя.

Если же выполняются следующие другие условия:

$$|\Delta I_y| \leq \Delta I_n/2; \quad \Delta I_x > \Delta I_n/2 \quad (21)$$

(что, например, отвечает режиму первоначального насыщения остановленного АД перед пуском), то искомое (соответствующее оптимальному по быстродействию регулированного статор-

ного тока) значение номера  $m^*$  находится в БЗН аналогично зависимостям (20):

$$\left. \begin{aligned} | \Delta U_{mx}^* | &= \max; \quad \text{sign}(\Delta U_{mx}) = \text{sign}(\Delta I_x); \\ \text{sign}(\Delta U_{my}) &= \text{sign}(\Delta I_y) \quad \text{при} \quad m = m^*. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Если контролируемые отклонения  $\Delta I$ ,  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  токов на входе БЗН отвечают условиям:

$$| \Delta I | > \Delta I_n / 2; \quad | \Delta I_x |, | \Delta I_y | \leq \Delta I_n / 2 \quad (23)$$

(что, например, характерно для стационарного режима АД), то искомое значение  $m^*$  определяется из (20), а асинхронному электроприводу с ШИМ присуще в указанном стационарном режиме релейное управление в "трубке" модулем  $I$  обобщенного вектора статорного тока [3]:

$$I^* - \Delta I_n / 2 \leq I \leq I^* + \Delta I_n / 2, \quad (24)$$

где  $I^* = [(I_x^*)^2 + (I_y^*)^2]^{1/2}$  – заданное значение модуля обобщенного вектора статорного тока.

Если же выполняются соотношения:

$$| \Delta I_x |, | \Delta I_y |, | \Delta I | \leq \Delta I_n / 2, \quad (25)$$

то на выходе БЗН сохраняется (в течение всего времени действия этого условия) прежнее искомое значение  $m^*$ , вследствие чего поддерживаются неизменными фактические открытые и закрытые состояния силовых ключей преобразователей частоты с ШИМ. Очевидно, это продолжается в пределах каждого межкоммутационного интервала до тех пор, пока значения отклонений токов  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$ ,  $\Delta I$  не "выйдут" за пределы границ заданной токовой "трубки", после чего определяется новое значение  $m^*$  и соответствующие ему открытые и закрытые состояния силовых ключей преобразователей, что было рассмотрено ранее для условий (18), (21) и (23).

Расчетно (методом Рунге-Кутты) на математической модели (для идеализированные представления АД и преобразователей с ШИМ [3] (рис.4) и экспериментально (на электроприводах с АИН-ШИМ и НПЧ-ШИМ для двигателя А02-51-6 мощностью 5,5 кВт) исследованы общий и усовершенствованный алгоритмы оптимального векторного управления статорным током АД. Полученные расчетные результаты (как на модели, так и с помощью приведенных в статье соответствующих упрощенных математических зависимостей) совпадают с экспериментальными с отклонением с погрешностью менее 2–5% (при этом производилось сопоставление опти-

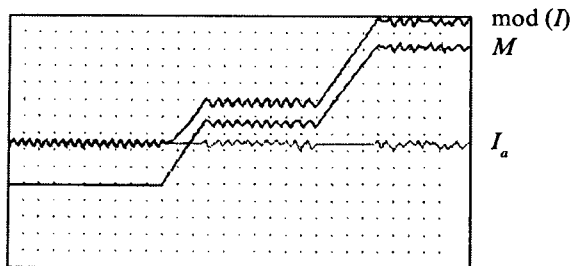
мальных (минимально возможных) значений  $t_{\Sigma 0}$  времени отработки скачкообразно задаваемого приращения  $\Delta I_y$  активной проекции вектора статорного тока).

### Выводы

1. Оптимальное значение  $t_{\Sigma 0}$  времени отработки статорного тока в асинхронных электроприводах с ШИМ не является строго неизменной величиной, а зависит: прямо пропорционально – от модуля  $|\Delta I_y|$  обрабатываемого приращения активной проекции вектора статорного тока и от значения суммарной индуктивности рассеяния  $L_\sigma$  двигателя, и обратно пропорционально – от двух наибольших возможных текущих значений проекций  $\Delta U_{\xi y}$ ,  $\Delta U_{\eta y}$  (удовлетворяющих условиям (7)) результирующих обобщенных векторов напряжения.

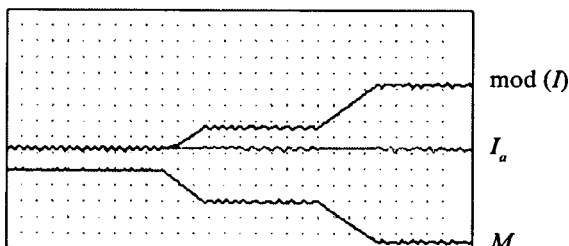
2. Поскольку указанные проекции  $U_{\xi y}$ ,  $\Delta U_{\eta y}$ , в свою очередь, зависят от взаимного геометрического расположения обобщенных векторов выходного напряжения  $\bar{U}_\xi$ ,  $\bar{U}_\eta$  преобразователя и оси – у (вращающейся ортогональной координатной системы x–y, связанной осью x с вектором потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}$  АД), а также – от значения вектора ЭДС  $\bar{E}$  ротора (модуль  $E$ , которого находится в прямо пропорциональной зависимости от угловой частоты поля двигателя), то  $t_{\Sigma 0}$  варьируется в зависимости от параметров режима работы АД: текущего (т.е. для данного момента времени) взаимного расположения обобщенного вектора потокосцепления ротора  $\bar{\Psi}$  АД относительно указанных обобщенных векторов выходного напряжения  $\bar{U}_\xi$ ,  $\bar{U}_\eta$  преобразователя и текущего значения угловой частоты поля (приблизленно скорости) двигателя. В частности, отработке номинального значения статорного тока (из режима ХХ) двигателя А02-51-6 соответствуют значения  $t_{\Sigma 0} = 4 \div 30$  мс – при положительной полярности приращения  $\Delta I_y$  для скорости АД, равной 0,9 номинальной:  $t_{\Sigma 0} = 0,26 \div 0,28$  мс – при отрицательной полярности  $\Delta I_y$  для той же скорости:  $t_{\Sigma 0} = 0,49 \div 0,56$  мс – при любой полярности приращения  $\Delta I_y$  для остановленного АД. Это свидетельствует о том, что быстродействие рассмотренных электроприводов существенно (возможно в десятки раз) превосходит быстродействие известных тиристорных электроприводов постоянного тока.

$$\begin{aligned} I_a &= .448E+00 > .552E+00 \\ \text{mod}(I) &= .446E+00 > .206E+01 \\ M &= -.145E-06 > .173E+01 \end{aligned}$$


 $t = .0000E+00 > .5980E-02, c$ 

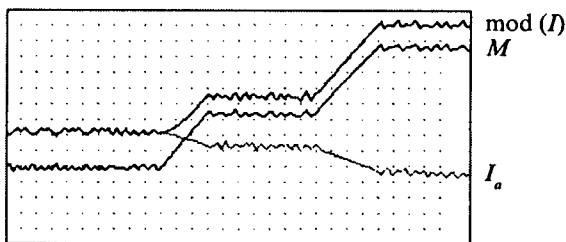
а)

$$\begin{aligned} I_a &= .448E+00 > .551E+00 \\ \text{mod}(I) &= .446E+00 > .204E+01 \\ M &= -.173E+01 > -.118E-06 \end{aligned}$$


 $t = .0000E+00 > .5980E-02, c$ 

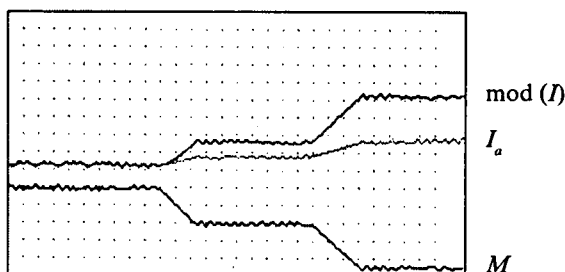
б)

$$\begin{aligned} I_a &= -.144E+00 > .541E+00 \\ \text{mod}(I) &= .450E+00 > .206E+01 \\ M &= -.446E-01 > .173E+01 \end{aligned}$$


 $t = .0000E+00 > .5980E-02, c$ 

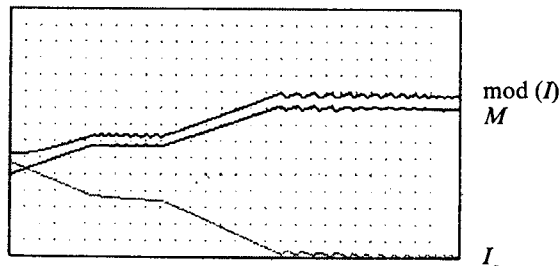
в)

$$\begin{aligned} I_a &= -.439E+00 > .112E+01 \\ \text{mod}(I) &= .450E+00 > .205E+01 \\ M &= -.173E+01 > .446E-01 > \end{aligned}$$


 $t = .0000E+00 > .5980E-02, c$ 

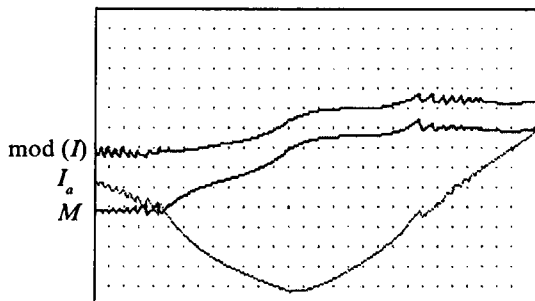
г)

$$\begin{aligned} I_a &= -.204E+01 > .322E+00 \\ \text{mod}(I) &= .501E+00 > .206E+01 \\ M &= -.139E-01 > .173E+01 \end{aligned}$$


 $t = .2000E-02 > .8000E-02, c$ 

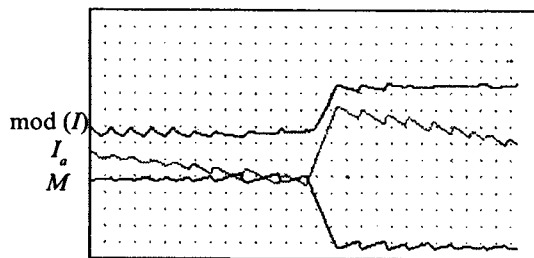
д)

$$\begin{aligned} I_a &= -.750E+00 > .721E+00 \\ \text{mod}(I) &= .453E+00 > .103E+01 \\ M &= -.547E-01 > .793E+00 \end{aligned}$$


 $t = .0000E+00 > .1196E-01, c$ 

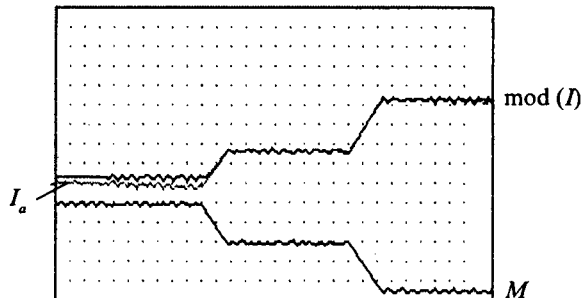
е)

$$\begin{aligned} I_a &= -.840E-01 > .795E+00 \\ \text{mod}(I) &= .449E+00 > .105E+01 \\ M &= -.801E+00 > .437E-01 \end{aligned}$$


 $t = .0000E+00 > .3990E-02, c$ 

ж)

$$\begin{aligned} I_a &= .268E+00 > .205E+01 \\ \text{mod}(I) &= .447E+00 > .205E+01 \\ M &= -.173E+01 > .360E-01 \end{aligned}$$


 $t = .0000E+00 > .6000E-02, c$ 

з)

Рис.4. Результаты математического моделирования асинхронного электропривода с АИН-ШИМ с двигателем А02-51-6 мощностью 5,5 кВт при различных значениях скорости двигателя:

а, б –  $\omega = 0$ ; в, г –  $\omega = 0,1$  о.е.; д, е –  $\omega = 0,5$  о.е.; ж, з –  $\omega = 0,9$  о.е.; а, в, д –  $I_y^* = 0 \rightarrow 0,87 \rightarrow 1,94$  о.е.; б, г, е, з –  $I_y^* = 0 \rightarrow -0,87 \rightarrow -1,94$  о.е.; ж –  $I_y^* = 0 \rightarrow 0,87$  о.е.

3. При одинаковых значениях амплитуд создаваемых обобщенных векторов выходного напряжения преобразователей достигаемое быстроедействие по току (для одного и того же двигателя и одинакового приращения тока) в электроприводах с АИН-ШИМ и НПЧ-ШИМ примерно равнозначно. Хотя в очень незначительной степени (менее 5%) лидирует по быстрдействию электропривод с НПЧ-ШИМ, вследствие большего возможного количества значений создаваемых в нем обобщенных векторов выходного напряжения преобразователя, с помощью которых становится осуществимым получение несколько более высоких текущих значений наибольших проекций  $\Delta U_{\xi y}$ ,  $\Delta U_{\eta y}$ , результирующих обобщенных векторов напряжения.

#### Список литературы

1. Дацковский Л.Х., Роговой В.И., Абрамов В.И. и др. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) // Электротехника. 1996. № 10. С.18–28.
2. Изосимов Д.Б., Козаченко В.Ф. Алгоритмы и системы цифрового управления электроприводами переменного тока // Электротехника. 1995. № 4. С.41–51.
3. Волков А.В. Анализ электромагнитных процессов и регулирование асинхронных частотно-управляемых электроприводов с широтно-импульсной модуляцией // Электротехника. 2002. № 1. С.2–10.
4. Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. Кишинев: Штиинца, 1982.
5. Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. М.: Энергоатомиздат, 1982.
6. Данциг Дж. Линейное программирование, его обобщения и применения: Пер. с англ. М.: Прогресс, 1966.
7. Бродовский В.Н., Иванов Е.С., Жилин А.С., Котелевский Н.Ф. Асинхронные приводы с частотно-токовым управлением // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1974. № 2.

**ВОЛКОВ Александр Васильевич** – главный конструктор электроприводов переменного тока ОАО НИИ "Преобразователь", профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Запорожского Национального технического университета, доктор техн. наук. В 1975 г. окончил электротехнический факультет Уральского политехнического института по специальности "Электропривод и автоматизация промышленных установок". В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию в Уральском политехническом институте, а в 1999 г. – докторскую диссертацию по теме "Электро-ромеханические процессы и регулирование асинхронных электроприводов с инверторными преобразователями частоты" в Национальной горной академии Украины (г. Днепродзержинск).

## К вопросу о выборе вида электропривода для одноковшовых экскаваторов в современных условиях

АБРАМОВ Б.И., ДЕМИДЕНКО В.И., КОГАН А.И., МОЦОХЕЙН Б.И.,  
ПАРФЁНОВ Б.М., ПОРТНОЙ Т.З.

Одноковшовые экскаваторы, эксплуатируемые и изготавливаемые в России [1,2], оборудуются электроприводами с системами "Г-Д" (генератор-электродвигатель постоянного тока) и "ТП-Д" (тиристорный преобразователь – электродвигатель постоянного тока) с аналоговыми системами управления, разработанными в 70-е годы. Зарубежные фирмы [1,3,4] с начала 70-х годов применяют электроприводы "ТП-Д" и "ПЧ-АД" (преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором) с аналоговыми, а в последние 10 лет с цифровыми системами управления.

Таким образом, на современном рынке электроприводов имеются системы "Г-Д", "ТП-Д" и "ПЧ-АД" с аналоговыми и цифровыми системами управления [1,5] (табл.1).

К настоящему времени выбор между различными видами электропривода производится на основании общих соображений, вытекающих из рекламных материалов различных фирм-разработчиков и производителей электроприводов. Пример такого подхода представлен в табл.2.

Однако при этом не всегда обеспечивается правильный однозначный выбор. Особенно сложно сделать выбор между электроприводами постоянного и переменного тока, которые непрерывно совершенствуются на основе цифровых систем управления и новых технологий силовой полупроводниковой техники, в результате чего сближаются их эксплуатационные и стоимостные показатели.

Это подтверждается практикой выбора вида привода основными ведущими экскаваторостро-

Таблица 1

## Виды электроприводов экскаваторов

| Вид электропривода             | Предприятия-изготовители  | На каких экскаваторах применяются  |
|--------------------------------|---|--|
| "Г-Д" с аналоговым управлением | Системы управления – АЭМЗ;<br>Электрические машины – ОАО "КЭМЗ",<br>ОАО "Динамо"  | ЭКГ-5  |
| "Г-Д" с цифровым управлением   | Системы управления – АО "Электросила",<br>ОАО "Рудоавтоматика",<br>ЗАО "Юрэль";<br>Электрические машины – АО "Электросила",<br>ОАО "КЭМЗ" | ЭКГ-10,<br>ЭКГ-12,<br>ЭКГ-15,<br>ЭШ 15-90,<br>ЭШ 20-90,<br>ЭШ 25-100 и др. |
| "ТП-Д" с цифровым управлением  | "General Electric",<br>"Harnischfeger",<br>ОАО "Электропривод"  | Marion,<br>Harnischfeger,<br>ЭКГ-20  |
| "ПЧ-АД" с цифровым управлением | "Siemens"   | Bucyrus  |

ительными фирмами – "Bucyrus", которая выбрала переменный ток, и "Harnischfeger", которая применяет электроприводы постоянного тока. Поэтому детальное сопоставление систем электропривода постоянного и переменного тока применительно к конкретному классу экскаваторов требует тщательного анализа вариантов.

Далее приводится один из возможных методов такого анализа, в котором сравнение различных вариантов производится по удельной

стоимости технологического процесса, капитальным затратам и потребительским свойствам электропривода. В основу этого метода положены идеи международных стандартов в области качества (ISO9000 – ISO9004), развитые применительно к электротехническим комплексам [6]. Согласно этим идеям, выбор вида электропривода должен производиться на основании критериев, охватывающих эксплуатационные, производственно-технологические и экономические показатели. Заказчику электропривода необходимо определить критерии для выбора электропривода, а затем применить эти критерии для своих условий. Содержание основных критериев приведено на рис.1.

Важнейшими показателями являются эксплуатационные. В расчетах сложно связать и объединить все эти показатели в комплексный показатель качества при выборе оптимального варианта электропривода. Поэтому на практике для сравнения различных вариантов электропривода стремятся найти интегральный показатель в численном виде. В качестве такого показателя предлагается применить "удельную стоимость технологического процесса", представляющую собой затраты на технологический процесс отнесенные к производительности,

$$УС = \frac{З}{П} \text{ руб/т,}$$

где УС – удельная стоимость технологического процесса; З – затраты на технологический процесс, руб; П – производительность – объем перемещенного грунта (включая копание), т.

Рассмотрим применение данного метода на примере экскаватора ЭКГ-10. Сравниваются следующие варианты:

"Г-Д" с аналоговым управлением (ГД-АУ), применяемый в настоящее время;

"Г-Д" с цифровым управлением (ГД-ЦУ);

"ТП-Д" с цифровым управлением (ТПД-ЦУ);

"ПЧ-АД" с цифровым управлением (ПЧАД-ЦУ).

Производительность (П) и затраты (З) для базового варианта (ГДАУ) принимаются по данным эксплуатации экскаватора ЭКГ-10 на Красногорском угольном разрезе Угольной Компании "Южный Кузбасс" (табл.3).

Производительность для других вариантов рассчитывается на основе механических характеристик электропривода и поправочных коэффициентов, учитывающих влияние некоторых эксплуатационных показателей, оцененных в баллах или относительных единицах. Механические характеристики сравниваемых электро-

Таблица 2

## Основные преимущества и недостатки различных видов электроприводов, применяемых для главных механизмов экскаваторов\*

| Вид электропривода  | Преимущества  | Недостатки  |
|---|---|---|
| Генератор-двигатель постоянного тока ("Г-Д")  | Опыт многолетнего производства и эксплуатации.<br>Хорошая совместимость с системой электроснабжения<br>Сравнительно меньшая стоимость комплекта электрооборудования | Низкий КПД<br>Большое количество коллекторных электрических машин   |
| Тиристорный преобразователь-двигатель постоянного тока ("ТП-Д")                             | Высокий КПД<br>Отсутствие щеточно-коллекторного устройства и вращающихся машин преобразовательного агрегата   | Необходимость в фильтрокомпенсирующих устройствах для обеспечения необходимой совместимости с системой электроснабжения |
| Преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором ("ПЧ-АД") | Применение простейшего асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором<br>Отсутствие щеточно-коллекторных устройств  | Сложность и высокая стоимость системы управления  |
| * Сравниваются современные системы с цифровым управлением                                   |   |   |

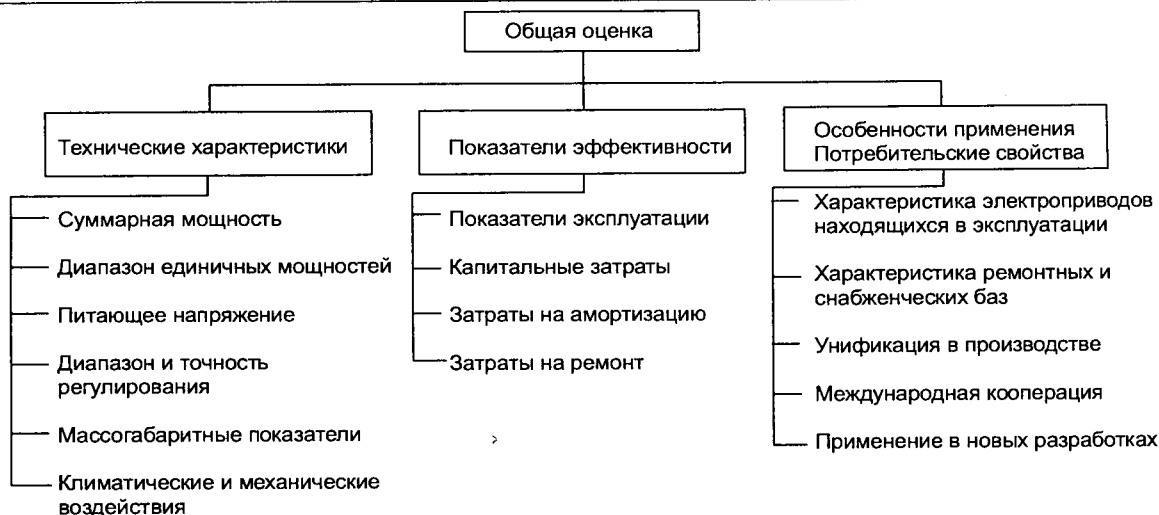


Рис.1. Основные критерии для выбора вида комплектного электропривода

Таблица 3  
Данные для расчета эксплуатационных показателей экскаватора ЭКГ-10

| Показатели   | Общие (по данным разреза "Красногорский") | Зависимые от электропривода по оценке ОАО "Электропривод" |
|--|---|---|
| Затраты, тыс.руб. в месяц:   |   |   |
| – услуги производственного характера (ремонт, наладка, обслуживание) | 3939                                      | 1500  |
| – материальные затраты (ЗИП, ГСМ, канаты)                            | 638                                       | 300   |
| – электроэнергия   | 478                                       | 300   |
| Суммарные затраты, тыс. руб. в месяц                                 | 5055                                      | 2100  |
| Производительность, т в месяц  | 50 700                                    |   |

приводов приведены на рис.2.

Эти характеристики ограничены возможностями механизмов экскаватора (редукторов, валов, канатов и пр.) и перегрузочной способностью приводного электродвигателя. Форма механической характеристики для систем с цифровым управлением принята прямоугольной, а для

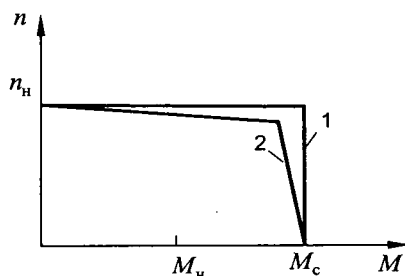


Рис.2. Механические характеристики электроприводов:

1 – с цифровой системой управления; 2 – с аналоговой системой управления

систем с аналоговым управлением зависит от электромагнитной инерции в системе "Г-Д" и структуры системы управления. К ним могут быть добавлены значения ожидаемого увеличения производительности от повышения надежности, уровня автоматизации, удобства обслуживания и других показателей оценки, выявляемых экспертным путем.

Затраты определяются по статистическим данным эксплуатации для базового варианта с выделением затрат, зависящих от электропривода, и их сравнением с ожидаемыми для рассматриваемого варианта. Затраты на эксплуатацию различных вариантов электропривода определены экспертным путем в сравнении с затратами для электропривода ГД-АУ; полученными по данным Красногорского разреза.

Производительность, затраты на эксплуатацию и удельная стоимость технологического процесса сведены в табл.4.

Показатели, приведенные в табл.4, указывают на технические преимущества системы ПЧАД-ЦУ перед другими сравниваемыми системами.

Теперь необходимо сравнить коммерческие показатели, которые содержатся в капитальных затратах и потребительских свойствах рассматриваемых вариантов.

Капитальные затраты для системы ГД-АУ приняты по данным Ижорского завода, приобретающего комплектный электропривод у ОАО "Электросила". Стоимость преобразователей частоты также принята по данным фирмы "Siemens". Стоимость остального электрооборудования рассматриваемых комплектов принята по данным предприятий-изготовителей (Карпинский электромашиностроительный завод, "Новая Сила", ОАО "Электропривод", "Электросила"). При-

Таблица 4

Производительность, затраты на эксплуатацию, удельная стоимость технологического процесса

| Показатели  | ГД-АУ           | ГД-ЦУ           | ТПД-ЦУ        | ПЧАД-ЦУ         |
|---|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Производительность, тыс.т в год (месяц)   | 605,5<br>(50,1) | 617,5<br>(51,4) | 638<br>(53,2) | 719,5<br>(60,0) |
| Затраты на эксплуатацию, тыс. руб. в месяц:   |                 |                 |               |                 |
| – общие   | 9000            | 8700            | 8400          | 8300            |
| – зависимые от электропривода   | 2100            | 1800            | 1400          | 1300            |
| из них:   |                 |                 |               |                 |
| – услуги производственного характера (ремонт, наладка, обслуживание)  | 1500            | 1200            | 1000          | 900             |
| – материальные затраты (ЗИП, ГСМ, канаты)   | 300             | 300             | 150           | 150             |
| Электроэнергия  | 300             | 300             | 250           | 250             |
| Удельная стоимость технологического процесса, руб. за т:  |                 |                 |               |                 |
| – общая   | 177             | 169             | 158           | 138             |
| – зависящая от электропривода   | 42              | 35              | 26            | 21,6            |
| Примечание. В общие затраты включены, помимо материальных и трудовых, косвенные затраты (рекультивация, амортизация, начисления на фонд оплаты труда и др). |                 |                 |               |                 |

мерная сравнительная стоимость различных комплектов электрооборудования приведена в табл.5.

В табл.6 приводятся сроки окупаемости новых видов электропривода и возможная допол-

Таблица 5

Стоимость различных видов комплектного электропривода экскаватора ЭКГ-10

| Состав комплексного электропривода             | ГД-АУ | ГД-ЦУ | ТПД-ЦУ | ПЧАД-ЦУ |
|--|-------|-------|--------|---------|
| Электромашинный преобразовательный агрегат     | 2,1   | 2,1   | –      | –       |
| Электродвигатели главных электроприводов       | 1,5   | 1,5   | 1,5    | 2,5     |
| НКУ управления главными электроприводами       | 2,5   | 3,7   | 5,5    | 5,7     |
| НКУ кабины машиниста (включая командоаппараты) | 2,2   | 2,5   | 2,5    | 2,5     |
| Комплектный электропривод                      | 8,3   | 9,5   | 9,48   | 10,7    |
| Дополнительные расходы (по сравнению с ГД-АУ)  | –     | 1,41  | 1,5    | 2,5     |

Таблица 6

Капитальные затраты и сроки окупаемости главных электроприводов экскаватора ЭКГ-10

| Показатели   | ГД-АУ | ГД-ЦУ | ТПД-ЦУ | ПЧАД-ЦУ |
|--|-------|-------|--------|---------|
| Комплектные электроприводы, млн.руб.   | 8,3   | 9,5   | 9,48   | 10,7    |
| Дополнительные затраты (по сравнению с ГД-АУ), млн.руб.                                      | –     | 1,2   | 1,27   | 2,4     |
| Годовая экономия от повышения производительности и снижения затрат на эксплуатацию, млн.руб. | –     | 0,059 | 0,495  | 2,290   |
| Сроки окупаемости, лет   | –     | 6     | 2,5    | 1,04    |
| Дополнительная прибыль за пять лет эксплуатации, млн.руб.                                    | –     | –     | 1,22   | 9,18    |

Таблица 7

Потребительские свойства электроприводов и особенности их разработки и применения

| Для вновь разрабатываемых электроприводов | Для модернизации электроприводов, находящихся в эксплуатации |
|---|--|
| Унификация                                | Показатели эксплуатации                                      |
| Международный уровень                     | Характеристика ремонтных и снабженческих баз                 |
| Кооперация                                | Состав экскаваторного парка                                  |
| Прогноз потребности                       |  |

нительная прибыль за первые пять лет их эксплуатации.

Из данных, содержащихся в табл.5,6, следует, что выбор вида электропривода для экскаватора ЭКГ-10 надо производить между электроприводами ГД-АУ, ТПД-ЦУ и ПЧАД-ЦУ с учетом их потребительских свойств, которые будут различными в зависимости от того, выбирается ли электропривод для новой модификации экскаватора ЭКГ-10 или для модернизации экскаватора, находящегося в эксплуатации. Табл.7 иллюстрирует это положение.

Показатели эффективности различных видов электропривода других типов экскаваторов, определенные тем же способом, как и для ЭКГ-10, приведены в табл.8.

Представленные материалы позволяют дать следующие рекомендации для выбора вида электропривода экскаватора.

Электропривод "Г-Д" целесообразно применять как в новых, так и в модернизируемых экскаваторах ЭКГ-5 и его модификациях, поскольку



Сроки окупаемости и дополнительная прибыль для различных видов электропривода

| Показатели   | ЭКГ-5 |        |         | ЭКГ-10 |        |         | ЭШ-20-90 |        |         |
|--|-------|--------|---------|--------|--------|---------|----------|--------|---------|
|  | "Г-Д" | "ТП-Д" | "ПЧ-АД" | "Г-Д"  | "ТП-Д" | "ПЧ-АД" | "Г-Д"    | "ТП-Д" | "ПЧ-АД" |
| Производительность, тыс. т в год   | 375   | 443    | 500     | 617    | 638    | 719     | 1200     | 1245   | 1425    |
| Затраты на эксплуатацию, млн.руб/год   | 70    | 60     | 50      | 104    | 100    | 99      | 150      | 120    | 110     |
| Стоимость технологического процесса, руб. за м <sup>3</sup>  | 186   | 135    | 100     | 169    | 158    | 138     | 125      | 92     | 77      |
| Годовая экономия, млн.руб.   | 0,02  | 0,30   | 2,00    | 0,06   | 0,50   | 2,30    | 0,15     | 4,15   | 7,70    |
| Капитальные затраты, млн.руб.  | 8,00  | 7,8    | 8,5     | 9,5    | 9,45   | 10,7    | 16,00    | 18,00  | 22,60   |
| Срок окупаемости, лет  | –     | 1      | 0,4     | –      | 2,5    | 1,04    | –        | 4,3    | 2,9     |
| Дополнительная прибыль за пять лет эксплуатации, млн.руб.  | –     | 1,50   | 8,00    | –      | 1,25   | 9,2     | –        | 4,00   | 14,5    |
| Примечания: 1. Для расчетов условно принято, что все виды электроприводов имеют цифровые системы управления.<br>2. За базу сравнения принята система "Г-Д" с аналоговым управлением и эксплуатационными показателями Красногорского разреза. |       |        |         |        |        |         |          |        |         |

ку он достаточно отработан, имеет сложившуюся инфраструктуру для его эксплуатации, а экономическая эффективность от применения других видов электропривода ("ТП-Д", "ПЧ-АД") незначительна.

Основным направлением совершенствования этого привода являются системы управления и регулирования на цифровой технологии с расширенными функциями диагностики и информации.

Применение электропривода "ТП-Д" наиболее целесообразно на крупных карьерных экскаваторах и драглайнах с ковшом более 15 м<sup>3</sup>. Для этого класса машины возможны унификация преобразователей и электродвигателей, а также использование имеющихся электродвигателей постоянного тока; повышение производительности и уменьшение расхода электроэнергии обеспечивают быструю окупаемость капитальных затрат и дополнительную прибыль.

Для широкого применения электропривода "ПЧ-АД" к настоящему времени отсутствуют условия по следующим причинам:

– отсутствие необходимой инфраструктуры для эксплуатации;

– необходимость изменения конструкции экскаваторов (редукторов, систем вентиляции и др.).

На этом этапе целесообразно накопить опыт применения этого вида электропривода на одном из типов экскаваторов, например, ЭКГ-10.

#### Список литературы

1. Портной Т.З., Парфенов Б.М., Коган А.И. Современное состояние и направления развития электротехнических комплексов одноковшовых экскаваторов. М.: Знак, 2002.
2. Щадов М.И., Ваницкий К.Е., Самородов Ю.П. Основные направления развития карьерных одноковшовых экскаваторов // Уголь. 1997. № 2. С. 18–22.
3. Система электропривода переменного тока для электрического канатного экскаватора с ёмкостью ковша 10 м<sup>3</sup>. Техническое предложение "Siemens". Альфаретта, США, 2001.
4. Парфенов Б.М. О применении на экскаваторах и буровых установках электроприводов постоянного тока // Электропривод постоянного тока. Состояние и тенденции. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С.33–46.
5. Шалагин М.А., Щеболев А.Ю., Верескунов В.Н., Пешехонов Д.В. Цифровая модульная сетевая система управления электроприводами // Электропривод и сетевые технологии. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С.115–122.
6. Абрамов Б.И., Коган А.И. и др. Прогнозирование качества и оптимальное проектирование электротехнических комплексов // Автоматизированный электропривод. М.: Знак, 2002. С.4–26.

## Гелиоэлектромеханика и солнечные циклы <sup>1</sup>

КОПЫЛОВ И.П.

МЭИ (ТУ)

*Рассматривается связь основных циклов солнечной активности с вращающимся магнитным полем Солнца.*

В основе гипотезы электромагнитной Вселенной лежит положение об обмене энергией между всеми объектами Вселенной на ультранизких гравитационных электромагнитных волнах [1]. Галактики обмениваются энергией (получают и отдают) с магнитным полем Вселенной. Звезды обмениваются энергией с Галактикой, а планеты, в том числе и наша Земля, получают энергию из Космоса, в основном, от Солнца [1–3].

Космические циклы в жизни человека и всего общества имеют определяющее значение. Сознание человека и общества людей связано с энергетическими условиями на планете, которые определяются участком пролета Солнечной системы в Галактике. Маршрут Земли проходит в различных секторах Галактики, энергетика которых диктует различное поведение людей. В настоящее время человек начинает анализировать и находить закономерности, объединяющие космические процессы и их проявления на Земле. Быстрые изменения событий на Земле есть результат ускоряющегося темпа изменения среды – участка – сектора Галактики, через который пролетает Солнечная система [4].

В повседневной жизни человек привык к солнечным и лунным циклам. Мы не представляем, что после ночи не наступит день, а зиму не сменит лето. Электромагнитный момент планеты связан с 28-дневными и суточными циклами, которые определяют семидневные погодные циклы, суточные двойные приливные волны и многие другие события на Земле [5].

Короткие космические циклы накладываются на галактические 13000-летние и 1000000000-летние полуциклы, которые определяют глобальные энергетические и геологические процессы на Земле [1–5].

Основу существования и энергетику всех элементов Солнечной системы определяет звезда – Солнце, масса которого в 750 раз больше мас-

сы всех вместе взятых планет [2]. Поэтому остановимся ниже на солнечных циклах.

Можно согласиться с тем, что главная роль Солнца – снабжать теплом и светом Солнечную систему. Но нельзя забывать о магнитном поле Солнца и его ультранизких частотах, определяющих вращение всех планет и циклы основных глобальных энергетических процессов на Земле [2, 3].

Совокупность всех нестационарных процессов в атмосфере Солнца принято называть солнечной активностью. Количественной оценкой является число Вольфа ( $W$ ), которое пропорционально сумме общего числа пятен  $f$  и удвоенного числа их групп  $g$ :

$$W = \alpha(f + 10g), \quad (1)$$

где  $\alpha$  зависит от разрешающей способности телескопа.

Солнечную активность принято связывать с вариациями магнитного поля Земли и другими геофизическими параметрами, которые характеризуются геомагнитной активностью  $K$  и  $A$ .

$K$  – это трехчасовая девятибалльная характеристика магнитной активности (изменения геомагнитного поля) от 0 до 9 баллов. Для характеристики магнитной активности всего земного шара вводится параметр  $K_p$ , который получается путем усреднения показаний нескольких обсерваторий, расположенных в разных точках земного шара.

Параметр  $A$  – это эквивалентная  $K$  амплитуда колебаний.

Для оценки геомагнитной активности за сутки используются суммы  $\Sigma K$  или  $\Sigma K_p$ , а также  $\Sigma A$  или  $\Sigma A_p$ . По суточным значениям путем осреднения вычисляются месячные и годовые значения параметров.

На рис.1 приведен временной ряд среднегодовых чисел Вольфа с 1700 по 1995 гг. Все циклы различаются по амплитуде и продолжительности в 11–12 лет.

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

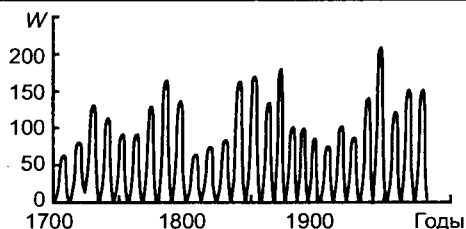


Рис.1. Временной ряд среднегодовых чисел Вольфа

Последний максимум солнечной активности наблюдался в середине 2001 г.

Нет сомнений, что оба параметра  $K$  и  $A$  связаны с магнитным полем Солнца. Однако поведение и строение магнитного поля Солнца изучено до сих пор недостаточно и даже многие астрономы говорят о переполюсовке магнитного поля, а не о вращающемся магнитном поле Солнца. Следует заметить, что магнитное поле Земли сфотографировано всего несколько лет назад.

В электротехнике принято считать, что изменение полярности (переполюсовка) происходит при переходе магнитного поля через нулевое значение. При вращении магнитного поля амплитуда магнитного поля не изменяется, а относительно неподвижного наблюдателя полярность магнитного поля меняется. Поэтому надо говорить не о переполюсовке, а о вращающемся магнитном поле Солнца.

Электротехники даже в простых электротехнических устройствах не имеют точного представления о их магнитном поле, однако это не мешает им создавать очень хорошие электромагнитные устройства. Магнитное поле Солнца во много раз сложнее тех магнитных полей, с которыми имеют дело инженеры, и знают о нем еще немного.

Магнитное поле Солнца создается, в основном, токами ядра Солнца, замыкающимися вокруг его ядра. Поэтому, в первом приближении, вращающееся магнитное поле Солнца можно представлять, как вращение поля сферического постоянного магнита [2].

Числа Вольфа, активность  $A$  связаны с вращающимся магнитным полем. Параметры  $P$  и  $A$  определяются косвенными наблюдениями, поэтому о вращении магнитного поля Солнца в настоящее время можно судить лишь по косвенным данным, которые сопряжены с достаточно неопределенными погрешностями.

Положение усложняется тем, что наблюдаемая поверхность Солнца совершает примерно один оборот в месяц, а Земля совершает за год один оборот вокруг Солнца. Это затрудняет на-

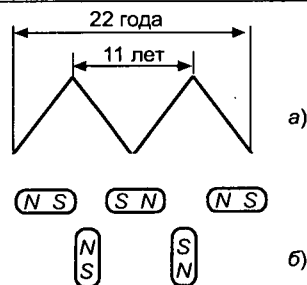


Рис.2. Связь циклов Чижевского (а) с вращающимся магнитным полем Солнца (б)

блюдения за числом Вольфа и площадью пятен, определяющих параметры  $\Sigma P$  и  $\Sigma A$ , по которым можно определить период вращающегося магнитного поля Солнца.

На рис.2 показана связь 11-летних циклов Солнца с вращающимся магнитным полем. Циклы А.Л.Чижевского не являются постоянными величинами и могут изменяться в пределах 10-12 лет. Период магнитного поля Солнца – постоянная величина, равная в среднем двум циклам солнечной активности. Астрономы, занимающиеся Солнцем, считают, что период магнитного поля Солнца равен 22 годам.

Естественным является попытка определить расчетным путем период магнитного поля Солнца, связывая его с максимумом солнечной активности, которая определяется экспериментально.

В [2,3] подробно рассмотрено вращение планет на высших и низших гармониках магнитного поля Солнца. Подходя к аналитическому определению циклов Вольфа и Чижевского в первом приближении целесообразно учитывать массу двух планет – гигантов Юпитера и Сатурна, которая составляет 80% массы всех других планет Солнечной системы. Массу других планет, в том числе и Земли, можно не учитывать.

Юпитер в гелиоэлектромеханической модели вращается на второй высшей гармонике, а Сатурн – на второй низшей. Юпитер совершает один оборот вокруг Солнца за 11,9 года, а Сатурн – за 9,5 лет [2,3].

Если связать систему координат с магнитным полем Солнца, то Солнечную систему можно представить, как синхронную машину (Юпитер), работающую параллельно с сетью бесконечной мощности (Солнце), у которой демпферная обмотка вынесена и вращается на отдельном роторе (Сатурн) (рис.3).

В синхронной машине демпферная обмотка обычно выполняется на роторе и в технической электромеханике нет примеров, когда демпфер-

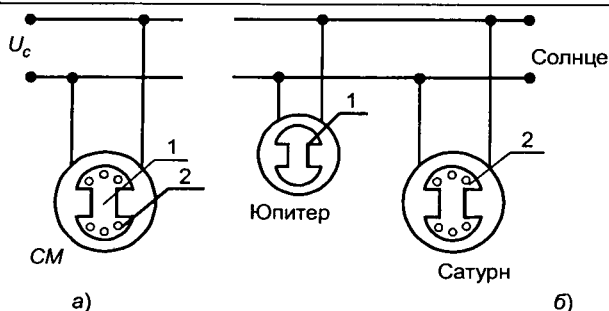


Рис.3. Синхронная машина (СМ) в сети бесконечной мощности (а) и система Солнце–Юпитер–Сатурн (б): 1 – ротор синхронной машины; 2 – демпферная обмотка

ная обмотка вынесена на другой ротор (рас.3,а). Однако вполне возможно соединить два ротора муфтой и два статора с разным числом полюсов подключить к сетям с различной частотой.

В Солнечной системе Юпитер и Сатурн не имеют видимой механической связи, но они жестко связаны в единую систему магнитным полем Солнца.

Демпферная (успокоительная) обмотка в синхронных машинах применяется для уменьшения качаний (колебаний относительно установившейся скорости). Сатурн – одна из планет, которая в Солнечной системе "живет" в асинхронном режиме и выполняет роль демпферной обмотки в системе Солнце–Юпитер–Сатурн (рис.3,б).

Рассматривая Солнечную систему, как Солнце–Юпитер–Сатурн, можно определить расчетным путем период вращающегося магнитного поля Солнца. Если среднее время одного оборота Юпитера вокруг Солнца 11,9 года и он вращается на второй гармонике магнитного поля Солнца, то период магнитного поля Солнца будет 23,8 года. При этих условиях цикл Чижевского должен быть 11 лет и 9 месяцев.

Продолжительность солнечных циклов в 24 года лучше соответствует астрономическим и астрологическим циклам, наблюдаемым тысячами [4].

В Солнечной системе Сатурн выполняет роль демпферной, успокоительной обмотки, обеспечивая устойчивое вращение других планет на резонансных частотах высших и низших гармоник вращающегося поля Солнца.

Относительная скорость (скольжение) Сатурна

$$s_{\text{Сат}} = \frac{\omega_{\text{С}} - \omega_{\text{Сат}}}{\omega_{\text{С}}}, \quad (2)$$

где  $\omega_{\text{С}}$  – синхронная скорость второй нижней гармоники магнитного поля Солнца;  $\omega_{\text{Сат}}$  – период вращения Сатурна вокруг Солнца. Скольжение  $s_{\text{Сат}} = 30 \div 40\%$  [2, 3].

Только Сатурн имеет четко видные кольца, много веков удивляющие астрономов. Кольца Сатурна с позиций гелиоэлектромеханики – это токи, эквивалентные токам в короткозамкнутом роторе асинхронной машины. Чтобы разобраться в удивительном поведении колец Сатурна, полезно обратиться к теории асинхронных машин. Все глобальные энергетические события на Земле связаны с магнитным полем Солнца и, в том числе, с токами в кольцах Сатурна. Все события во всех уголках Солнечной системы зависят от периода (цикла) вращающегося магнитного поля Солнца.

Аналогия между синхронной машиной, работающей в сети бесконечной мощности, и системой Солнце–Юпитер–Сатурн послужит мощным стимулом в развитии гелиоэлектромеханики. Возможный перенос достижений теории классической земной электромеханики на Солнечную систему таит большие возможности.

### Вывод

Гелиоэлектромеханика сделала первые шаги благодаря достижениям космической электромеханики. Взаимное проникновение земной электромеханики и гелиоэлектромеханики послужит дальнейшему развитию теории и практики электромеханического преобразования энергии.

### Список литературы

1. Копылов И.П. Электромагнитная Вселенная. М.: Изд-во МЭИ, 1999.
2. Копылов И.П. Гелиоэлектромеханика. М.: Изд-во МЭИ, 2002.
3. Копылов И.П. Электромеханика Солнечной системы // Электротехника. 2002. № 10.
4. Бушуев В.В., Копылов И.П. Энергокосмизм России. М.: Изд-во АЦ "Энергия", 2003.
5. Копылов И.П. Геоэлектромеханика. М.: Изд-во МЭИ, 2000.





их поверхности. Оплавленный с поверхности слитков металл скапливается на днище ванны и периодически удаляется через затвор 8.

После оплавления транспортер 6 перемещает слитки вдоль оси печи ЭШО через вторую полость к разгрузочному устройству для отправки заказчику. Третий конструктивный вариант ЭТУ ЭШО позволяет полностью механизировать процесс очистки поверхности слитков путем ее оплавления, что гораздо эффективнее, например, механической обдирки на алмазных станках. Кроме того, отходы, удаляемые через затвор 8, легче собираются и утилизируются с меньшими затратами, чем стружка при механической обдирке.

Как легко увидеть из приведенных трех конструктивных вариантов электротермических установок для электрошлаковой очистки поверхности слитков они отличаются методами компенсации теряемой при очистке энергии за счет ее внешних источников дугового или индукционного характера.

Энергосберегающей задачей при передаче слитков из разливочного пролета, например, в отделение электрошлаковой регенерации поверхности слитков является определение минимального времени, прошедшего после начала кристаллизации слитка стали, т.е. конца разливки, по истечении которого можно извлекать слиток из изложницы с исключением вероятности его разрыва из-за давления жидкой фазы на стенки сосуда, образованного твердой (кристаллической) фазой. Эту задачу решали путем вычисления времени  $t$ , за которое у слитка образуется корка из металла твердой фазы толщиной  $x$ , достаточной, чтобы при подъеме слитка с ускорением  $b$  напряжение, вызванное давлением жидкого металла изнутри, не превышало бы напряжения предела упругости корки (температура которой близка к  $T_k$  – температуре кристаллизации). В этом случае удастся максимально сохранить аккумулярованную металлом после выплавки в электросталеплавильной печи энергию и использовать ее в качестве "внутреннего" источника, экономя расход энергии от "внешних" источников дугового или индукционного типа (рис.1, 2).

Отдельной ресурсо- и энергосберегающей задачей является учет особенностей работы системы автоматического управления печью ЭШО путем корректировки ее традиционного алгоритма управления источником питания по динамическому принципу в функции знака сигнала рассогласования между заданным прираще-

нием сопротивления шлаковой ванны и измеренным на дискретном отрезке времени. Динамический принцип обеспечивает резкое повышение точности САУ.

Программное управление электротехнологической установкой работающей на переменном токе, в том числе электропечью ЭШО, традиционно обеспечивает изменение скорости перемещения электрода в функции сопротивления шлаковой ванны, управление источником питания в функции скорости очистки или оплавления поверхности легированных слитков, зависящих от степени загрязнения, глубины изъёмов и неметаллических включений на поверхности слитков и, наконец, дискретную по времени, например от 1 до 5 мин в зависимости от поверхности (диаметра) оплавляемого слитка, динамическую корректировку напряжения источника питания с целью уменьшения постоянной времени объекта и повышения точности управления.

Заданные значения (уставки) сопротивления шлаковой ванны формируют программным путем в функции времени ЭШО и (или) количества очищаемых (оплавляемых) загрязнений поверхности слитков. Задание уставок регулируемых параметров осуществляется традиционно в памяти микропроцессорного устройства, конструкцию алгоритма которого изменяем по динамическому принципу.

Алгоритм управления электротехнологической установкой ЭШО включает:

- вычисление активной мощности шлаковой

ванны  $P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$ , где  $u, i$  – мгновенные значения

тока и напряжения шлаковой ванны;  $T = 0,02$  с – период переменного тока;

- вычисление квадрата действующего значения тока  $I^2$  энергопередающего в шлаковую ванну устройства (электрода);

- вычисление сопротивления шлаковой ванны  $R_{\text{шл}} = P / I^2$ ;

- вычисление заданного значения сопротивления шлаковой ванны (программирование)  $R_{\text{зад}} = R_{\text{начк}} \pm \Delta R_k n$ , где  $R_{\text{начк}}$  – начальное значение сопротивления на  $k$ -ом временном интервале;  $\pm \Delta R_k$  – наклон участка (+ для положительного наклона, – для отрицательного);  $n$  – номер дискреты времени от  $k$ -го участка;

- вычисление  $\delta R = R_{\text{зад}} - R_{\text{шл}}$  и запоминание этой разности с учетом знака;  $\delta R_{\text{шл}}$  является задающим сигналом для привода перемещения электрода на время вычисления следующего значения  $\delta R_{\text{шл}}$ ; точность управления по  $P$  и  $I^2$  не

меньше 1%, а по  $R_{шл}$  не хуже 2% при колебаниях входных сигналов по току и напряжению в диапазоне 1:5 и  $\cos \varphi = 0,6 \div 1,0$ ;

- отсчет заданной дискреты  $T_d$  времени (от 1 до 15 мин) по каналу управления переключением ступеней напряжения;

- счет количества импульсов  $N$ , поступающих от датчика, установленного на валу двигателя перемещения энергопередающего устройства (электрода) в течение заданной дискреты времени  $T_{д1}$ ;

- вычисление заданного количества импульсов  $N_{зад}$  (программирование по каналу управления источником питания)  $N_{зад} = N_{начк} \pm \Delta N_k n$ , где  $N_{начк}$  – начальное значение для  $k$ -го участка управления;  $n$  – номер дискреты времени с начала участка;

- вычисление  $\delta N = N_{зад} - N$ ;

- проведение логических операций  $\text{sign } \delta N = (-)$  – уменьшение напряжения источника питания;  $\text{sign } \delta N = (+)$  – увеличение напряжения; для форсированного перехода можно использовать логическую операцию, например, если  $15 < |\delta N| < 30$ , то переключить одну ступень напряжения источника питания, а в случае  $|\delta N| > 30$  – переключить две ступени напряжения;

- для введения динамической корректировки управления источником питания в функции знака рассогласования между заданным приращением сопротивления шлаковой ванны на дискретном отрезке времени и измеренным при  $R_{шл} = R_{шл.зад}$  дискриминация (прерывание канала управления по скорости перемещения энергопередающего устройства (электрода);

- отсчет заданной дискреты времени  $T_{д2}$  (от 1 до 5 мин);

- вычисление приращения сопротивления шлаковой ванны за дискретный момент времени  $T_{д2}$ :  $\Delta R_{шлк} = R_{шлк} - R_{шлк(k-1)}$ ;

- вычисление рассогласования между заданным приращением сопротивления шлаковой ванны и вычисленным в предыдущей операции,  $\delta \Delta R_{шлк} = \Delta R_{шлк.зад} - \Delta R_{шлк}$ ;

- определение знака результата предыдущей операции ( $\text{sign } \delta \Delta R_{шлк}$ );

- проведение логических операций: если  $\text{sign } \delta \Delta R_{шлк} = (-)$ , то уменьшение напряжения источника питания на одну ступень, а если  $\text{sign } \delta \Delta R_{шлк} = (+)$ , то его аналогичное увеличение;

- прерывание управления по динамическому принципу рассогласования заданного и измеренных приращений сопротивления шлаковой ванны и отмена дискриминации канала управления передвиганием энергопередающего устройства;
- циклическое повторение динамической корректировки по дискриминационному принципу.

#### Список литературы.

1. Попов В.Н., Минеев Р.В. О перспективах энерго- и ресурсосберегающего метода электрошлаковой очистки поверхности легированных изделий // Актуальные проблемы современной науки. 2002. № 3. С. 335–337.
2. Пат. 17348885 РФ. МКИ<sup>3</sup> В 08 В 3/10. Установка для очистки металлических изделий / Р.В. Минеев, И.А. Игнатов // Открытия. Изобретения. № 19. 1992.
3. Рубцов В.П., Дмитриев И.Ю., Минеев А.Р. Параметры дугового разряда и их влияние на эффективность работы электротехнологических установок // Электричество. 2000. № 12. С. 40–45.

## ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

### Вакуумные коммутационные аппараты нового поколения

СИВЯКОВ С.К., зам. главного инженера

ФГУП «НПП «Контакт» (г.Саратов)

В концепции "Основных направлений технического развития электрических распределительных сетей на период до 2010 года", разработанных РАО "ЕЭС России" указывается на необходимость создания гаммы высоконадежных и долговечных аппаратов для коммутации токов

до 3150 А и осуществления защитных функций (разрыв цепи) при токе КЗ до 40 кА.

ФГУП "НПП "Контакт" специализируется на разработке, совместно с ВЭИ им.Ленина, и производстве вакуумных выключателей различных модификаций.



Вакуумные выключатели – передовая технология в коммутации силовых электрических цепей. Малая степень выгорания контактов гарантирует долговечность и высокую коммутационную износостойкость.

В вакуумных аппаратах ФГУП "НПП "Контакт" используются вакуумные камеры собственного производства по разработкам ВЭИ им.Ленина.

В настоящее время НПП "Контакт" серийно выпускает выключатели и контакторы класса напряжений 1,14, 10 и 35 кВ на номинальные токи от 160 до 3150 А и токи отключения от 4 до 31,5 кА. Производство вакуумных камер и коммутационной вакуумной аппаратуры сертифицировано органами сертификации системы качества "Центросерт", имеющей аттестат аккредитации Немецкого совета по аккредитации.

Система качества производства вакуумной техники НПП "Контакт" соответствует требованиям стандарта ISO 9001-1994/DIN ISO 9001-1994. Испытательный центр предприятия, аккредитованный в системе "Энергосерт", проводит непрерывные ресурсные испытания аппаратов, что позволяет поддерживать высокое качество и постоянно совершенствовать конструкцию производимой продукции, при этом гарантирована безопасная работа аппаратов на протяжении всего срока эксплуатации, а основные параметры находятся в пределах норм ТУ и не требуют дополнительной регулировки.

Качество, надежность и широкий диапазон параметров выпускаемых вакуумных аппаратов и камер позволили им занять ведущее место на российском рынке (табл.1, 2).

Таблица 1

Высоковольтные вакуумные коммутационные аппараты

| Наименование  | $U_{ном}$ , кВ | $I_{ном}$ , А       | $I_{откл}$ , кА | $I$ (потребность при включении), А | Механические и коммутационные ресурсы, тыс. | Число отключений КЗ | Масса, кг |
|---|----------------|---------------------|-----------------|------------------------------------|---|---------------------|-----------|
| Выключатели мощности:<br>– ВБЭ 10-20/1000 – 1600 УХЛ2 | 10             | 630<br>1000<br>1600 | 20              | 40                                 | 50,0  | 100                 | 110       |
| – ВБЭ 10-31,5/2000 УХЛ2                               | 10             | 1600<br>2000        | 31,5            | 70                                 | 25,0  | 50                  | 120       |
| – ВБЭ 10-31,5/3150 УХЛ2                               | 10             | 3150                | 31,5            | 70                                 | 25,0  | 30                  | 140       |
| – ВБ 10-20/1600 УХЛ2                                  | 10             | 1000<br>1600        | 20              | 4,5                                | 50  | 150                 | 70        |
| – ВБЭМ 10-12,5/800 УХЛ2                               | 10             | 800                 | 12,5            | 20                                 | 50  | 100                 | 50        |
| – ВБЭМ 10-20/1000 УХЛ2                                | 10             | 1000                | 20              | 35                                 | 50  | 100                 | 50        |
| – ВБЭТ 27,5-25/1600 УХЛ1                              | 27,5           | 630<br>1600         | 25              | 50                                 | 20  | 50                  | 380       |
| – ВБЭТ 35-25/1600 УХЛ1                                | 35             | 630<br>1600         | 25              | 100                                | 20  | 50                  | 780       |
| – ВБЭК 35-25/1600 УХЛ2*                               | 35             | 630<br>1600         | 25              | 100                                | 20  | 50                  | 350       |
| – ВБЭС 35-31,5/1600 УХЛ2*                             | 35             | 630<br>1600         | 31,5            | 100                                | 20  | 50                  | 370       |
| Выключатель нагрузки<br>ВНБ 10-630-16 УХЛ2            | 10             | 630                 | 16              | 20                                 | 50  | –                   | 50        |
| Контактор КВТ 10-4/400 У2                             | 10             | 400                 | 4               | 5                                  | 750   | –                   | 38        |

\* Выпуск с 2003 г.

Таблица 2

Низковольтные вакуумные коммутационные аппараты

| Наименование         | $U_{ном}$ , кВ | $I_{ном}$ , А | $I_{откл}$ , кА | $I$ (потребность при включении), А | Механические и коммутационные ресурсы, тыс. | Число отключений КЗ | Масса, кг |
|----------------------|----------------|---------------|-----------------|------------------------------------|---|---------------------|-----------|
| Контакторы:          |                |               |                 |                                    |   |                     |           |
| –КВТ 1,14–2,5/160 УЗ | 1,14           | 160           | 2,5             | 3                                  | 1600  | –                   | 5,8       |
| –КВТ 1,14–2,5/250 УЗ | 1,14           | 250           | 2,5             | 3                                  | 1600  | –                   | 6,0       |
| –КВТ 1,14–4/400 УЗ   | 1,14           | 400           | 4               | 3                                  | 1600  | –                   | 6,5       |
| –КВТ 1,14–5/630 УЗ   | 1,14           | 630           | 5               | 5                                  | 1600  | –                   | 10        |
| –КВТ 1,14–5/1000 УЗ* | 1,14           | 1000          | 5               | 5                                  | 1600  | –                   | 12        |

\* Выпуск с 2003 г.

НПП "Контакт" разработал принципиально новый выключатель типа ВБ 10-20. По своим параметрам и качеству исполнения он находится на уровне лучших мировых аналогов, выпускаемых ведущими фирмами такими как АББ, "Сименс", "Шнайдер Электрик" и др., при этом значительно меньше стоит: в 1,5–2 раза.

Принципиальное отличие заключается в том, что выключатель ВБ 10-20 (31,5) имеет модульную конструкцию и может выпускаться как с электромагнитным, так и с пружинным приводом (ток потребления при включении 3–5 А), а также с различным межфазным расстоянием (150, 200, 230 мм) и полным набором расцепителей.

Выключатель ВБ 10-20 обладает:

- возможностью оперативного включения вручную при отсутствии питания;
- оригинальной конструкцией главной цепи с низким электрическим сопротивлением;
- надежной конструкцией дугогасительных модулей, (трубообразные прозрачные полимерные изоляторы полностью защищают камеру от механических и электрических повреждений, а также вредных воздействий окружающей среды);
- совместимостью как с релейными схемами существующих систем управления и защиты за счет КРУ, оснащения всеми исполнительными элементами защиты (до 6 типов расцепителей), так и с новейшими микропроцессорными системами управления и защиты;
- надежной механической защелкой, исключающей возможность несанкционированного отключения;
- возможностью работать без дополнительного подогрева в широком диапазоне температур (от – 60 до +55°C);
- простотой конструкции, сводящей к минимуму его обслуживание;

– возможностью отключения тока 20 кА до 150 раз, в том числе 3–5 раз тока до 25 кА в экстремальных ситуациях (подтверждено испытаниями в независимых аккредитованных центрах).

Выключатель ВБ 10-20 создан, опираясь на опыт разработки целой серии аппаратов, с учетом мировых достижений и новых технологий, а также замечаний и предложений потребителей.

Конструкция выключателя позволяет работать по безлюдной технологии, практически без обслуживания на протяжении 25 лет, что осо-

бенно важно в условиях Крайнего Севера (температура до –60°C), а также в зонах со значительным суточным перепадом температур (условия выпадения росы). Защитные полимерные колбы предохраняют вакуумную камеру от грязи и пыли при использовании в горнодобывающих промышленности, на крупных строительствах и т.п.

В настоящее время НПП "Контакт" завершил сертификационные испытания и вводит серийный выпуск выключателя ВБ 10-20 УХЛ2.

Еще одним перспективным направлением в области вакуумного коммутационного аппаратостроения является создание новейших выключателей класса 35 (27,5) кВ.

Это ряд аппаратов на номинальные токи 630 – 1600 А, с токами отключения 25–31,5 кА, исполнения УХЛ1 и УХЛ 2. Они имеют как стационарное, так и выкатное исполнение, у них полностью отсутствует масло, усилена изоляция на полимерной основе, которая не требует обслуживания на протяжении всего срока службы выключателя и прошла все необходимые испытания в независимых испытательных центрах.

Во всех аппаратах применяются вакуумные камеры собственного производства, качество которых признано лучшим в России, ни в чем не уступая зарубежным аналогам и во многом их превосходя.

Предприятие сегодня выпускает свыше 15 разновидностей камер самых различных номиналов как для собственных нужд, так и для реализации всем заинтересованным предприятиям.

### Вакуумные дугогасительные камеры

#### Камеры на $U_n \approx 1,14$ кВ:

- КДВА 1,14-26/100 УХЛ2
- КДВ 2-1,14-2,5/250 ВЗ
- КДВ 2-1,14-4,0/400 ВЗ
- КДВ 2-1,14-5,0/630 УХЛ2

#### Камеры на $U_n = 10$ кВ:

- КДВА 5-10-20/1600 УХЛ2
- КДВА 2-10-31,5/3150 УХЛ
- КДВХ 4-10-20/1600 УХЛ2
- КДВ 3-10-5/400 УХЛ2
- КДВ 2-10-40/3150 УХЛ2
- КДВА2-10-31,5/1600 УХЛ2
- КДВА 2-10-12,5/800 УХЛ2
- КДВА 2-10-16/1000 УХЛ2

– КДВА 2-10-20/100 УХЛ2

Камеры на  $U_n = 35$  кВ:

– КДВ 2-35-31,5/1600 УХЛ2 (выпуск с 2003 г.)

– КДВ 2-35-25/1600 УХЛ2

– КДВ 35-40/2000 УХЛ2

– КДВ-35-12,5/630 УХЛ2

НПП "Контакт" это динамично развивающееся предприятие оно за шесть лет разработало и освоило производство свыше 10 типов высоковольтных вакуумных аппаратов различных модификаций, а также свыше 5 разновидностей низковольтных контакторов, которые уверенно завоевали популярность на рынке. НПП "Контакт" имеет в своем составе службы применения и адаптации, готовые оказать всестороннюю помощь потребителю, а также обеспечить сервисное обслуживание своих аппаратов.

НПП "Контакт" открыто для любых форм сотрудничества.

Наш адрес:



Саратовское ордена "Знак Почёта"  
Федеральное государственное унитарное  
предприятие "Научно-производственное  
предприятие "КОНТАКТ"

Система качества сертифицирована по  
требованиям ИСО 9001

410033, г.Саратов, 8-я Дачная,

ул. им. Спицына Б.В. 1,

теле/факс (8452) 36-74-76,

E-mail: office@kontakt-saratov.ru

http:// www. kontakt-saratov.ru

Отдел маркетинга: тел.: (8452) 33-25-05

тел/факс: (8452) 33-78-45

Отдел сбыта: тел.: (8452) 37-43-68

тел/факс: (8452) 33-78-06

По техническим вопросам обращаться:

тел. (8452) 37-44-35

тел/факс: (8452) 36-74-13

## ДИСКУССИЯ

### К вопросу о создании линейного электромагнитного двигателя<sup>1</sup>

БИХМАН Р.И., канд. техн. наук, ДОЛКАРТ В.М., доктор техн. наук

Как справедливо отмечает В.М. Малыгин [1] в [2] "вся теоретическая часть базируется на классических законах электромагнетизма". Однако при дальнейшем рассмотрении принципа работы линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД) В.М. Малыгин допускает существенные ошибки в интерпретации принципов работы ЛЭМД, описанных в [2].

1. В разделе 1 анализа [1] приведена формула (1) для результирующей магнитной индукции  $B_p$  в магнитопроводе  $B_p = B_0 + B_m$ , верная для магнетика, внесенного в магнитное поле, где  $B_0$  – индукция внешнего поля;  $B_m$  – индукция поля намагниченного магнетика.

В конструкции ЛЭМД магнитный поток, проходящий по вертикальной части магнитопровода и пересекающий плоскость витков рабочей обмотки, состоит из магнитного потока намагничивания магнитопровода токами в продольной части витков рабочей обмотки, неподвижного относительно ЛЭМД и витков рабочей обмотки, и концентрированного магнитного потока внешнего поля  $B_0$ , неподвижного в инерциальном пространстве и потому пересекающего поперечные витки рабочей обмотки в зоне концентратора. Индукция концентрированного внешнего магнитного поля [2]

$$B_k = B_0 L / 2\delta, \quad (1)$$

где  $B_0$  – индукция внешнего поля;  $L$  – ширина магнитопровода концентратора;  $\delta$  – толщина листов магнитопровода.

<sup>1</sup> Рассмотрены положения статьи В.М. Малыгина [1].

Поскольку магнитный поток намагничивания магнитопровода неподвижен относительно обмотки, то и рассмотрение силы создаваемой от взаимодействия тока в обмотке с созданной этим током магнитным потоком в магнитопроводе **бессмысленно**.

А потому формула (2), приведенная В.М. Малыгиным [1], для силы, действующей на сторону витка с током, помещенного в зазоре между полосками магнитопровода

$$F = I(B_0 + B_m)l - IB_0l = IB_m l$$

**абсолютно неверна** и не соответствует формуле (2) для силы, действующей на виток обмотки, приведенной в [2]:

$$F_v = 2B_k \delta I - B_0 I,$$

где рассмотрено взаимодействие стороны витка, находящейся в зоне концентратора ( $B_k, \delta$ ), и стороны витка, находящейся вне концентратора ( $B_0, l$ ).

В связи с изложенным дальнейший анализ, приведенный в разделе 1, опровергает лишь созданный В.М. Малыгиным принцип работы ЛЭМД и не имеет **никакого отношения** к существу рассматриваемого в [2] вопроса.

2. Раздел 2 анализа проведенного В.М. Малыгиным, посвящен изложению основ электротехники по поведению витка с током в однородном магнитном поле и работы, произведенной проводником с током, движущимся в магнитном поле, за счет энергии потребляемой от источников питания. Эти материалы широко известны, но **не имеют отношения** к работе витка с током, **одна сторона** которого помещена в концентратор магнитного поля.

3. Раздел 3 анализа излагает содержание теоремы Пойнтинга как "формулировку закона сохранения энергии для электромагнитного поля", ссылаясь на [3, с.240], в то время как в [3, с.239] дана следующая формулировка теоремы Пойнтинга: "Убыль энергии за единицу времени в данном объеме равна потоку энергии сквозь поверхность, ограниченную этим объемом, плюс работа в единицу времени (т. е. мощность  $P$ ), которую поле производит над зарядами вещества внутри данного объема", т.е. теорема Пойнтинга определяет изменение энергии электромагнитного поля в данном объеме и обосновывает работу **производимую магнитным полем** внутри данного объема.

Т.е. вывод, сделанный В.М. Малыгиным из неправильной формулировки теоремы Пойнтинга, выглядит, по меньшей мере, **неубедительным**.

4. В разделе 4 статьи В.М. Малыгина, как впрочем и в названии самой статьи, делается попытка представить проблему как обсуждение лишь теоретической возможности создания ЛЭМД, поскольку, по его мнению, результатам испытаний макетного образца ЛЭМД доверять нельзя, как нельзя доверять и специалистам, производившим эти испытания.

При этом рассмотрение В.М. Малыгиным результатов испытаний макетного образца ЛЭМД носит исключительно гипотетический характер и не основывается на действительной конструкции и месте расположения стенда.

Нужно отметить, что те соображения, которые автор статьи [1] высказывает относительно побочных причин, вызывающих изменение количества колебаний в двигательном и тормозном режиме, неоднократно высказывались и ранее, начиная с посвященного этой проблеме семинара, проведенного Р.И. Бихманом в 1999 г. На семинаре присутствовали представители ФГПУ "НИИЭМ", которые и тогда высказывали те же самые соображения о невозможности создания ЛЭМД.

Естественно, что все критические замечания учитывались нами в процессе создания и усовершенствования стенда, чтобы не возникало никаких сомнений в достоверности результатов испытаний ЛЭМД.

Стенд располагался в административном здании ВНИИЭМ, во дворце XVIII века, построенном без использования железобетона. В административном здании, вблизи стенда, нет никакого оборудования и никаких ферромагнитных масс. В [4] отмечается, что в зоне перемещения магнитного образца ЛЭМД магнитное поле Земли, как показали измерения, является однородным. В этой же статье отмечается, что "измерительная установка для испытания ЛЭМД обеспечивает плоскопараллельное движение макета ЛЭМД" в однородном магнитном поле Земли. При этом магнитный момент ЛЭМД, как видно из приведенной в [4, рис.2] схемы измерительной установки, всегда направлен по вертикальной оси и не отличается в двигательном и тормозном режимах ни по значению, ни по направлению, потому и не может служить причиной

различного числа колебаний ЛЭМД в двигательном и тормозном режимах испытаний.

### Выводы

1. Проведенный в статье В.М. Малыгина анализ касается принципов работы ЛЭМД, созданных воображением самого автора, и не соответствует принципам работы ЛЭМД, описанным в [2]. Автор анализа не дал себе труда детально разобраться в принципах работы ЛЭМД, изложенных в [2]. Над В.М. Малыгиным довлеет классическое представление, что рамка с током не способна создавать силу при движении в однородном магнитном поле. Он не понимает, каким образом в ЛЭМД происходит концентрация и изменение конфигурации магнитного поля Земли и что не однородное, а именно сконцентрированное и сконфигурированное должным образом магнитное поле создает при пересечении обмотки ЛЭМД нескомпенсированную силу, действующую на обмотку и через нее на спутник.

2. Разработанное устройство ЛЭМД, макетный образец которого был успешно испытан на стенде [3], прошло российскую и международную экспертизу. На различные варианты конструкции ЛЭМД выданы два российских патента [5,6] и получен положительный ответ международной экспертизы по международной заявке, основывающейся на имеющихся в российской и международной практике прототипах.

3. Дальнейшие работы в области создания различных конструкций ЛЭМД позволили найти технические решения для устройства ЛЭМД, создающие внешние линейные силы не только в направлении полета искусственного спутника

Земли (ИСЗ), но и в направлениях перпендикулярных направлению полета, лежащих в плоскости местного горизонта, без нарушения ориентации ИСЗ относительно орбитальной системы координат.

4. Можно, наконец, предположить, что целью написания В.М. Малыгиным данной статьи явилось желание породить у неискушенных читателей, не имеющих возможности по тем или иным причинам вникнуть подробно в теорию функционирования ЛЭМД, сомнения в возможности вообще создания такого ЛЭМД.

Возможно также, что автор статьи пытается сохранить использование на спутниках электрореактивных двигателей, работающих с расходом рабочего тела и большим потреблением электроэнергии, в том числе и разрабатываемых ФГПУ "НИИЭМ", вместо перехода к использованию на низкоорбитальных спутниках с длительным сроком существования на орбите, 10 и более лет, линейных электромагнитных движителей.

### Список литературы

1. Малыгин В.М. Анализ теоретического обоснования возможности создания линейного электромагнитного движителя // Электротехника. 2003. № 2.
2. Бихман Р.И. Конструкция линейного электромагнитного движителя // Электротехника. 2002. № 6.
3. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М.: 1983.
4. Бихман Р.И., Долкарт В.М. Испытания макетного образца линейного электромагнитного движителя // Электротехника. 2001. № 4.
5. Пат. 2162812 РФ. Устройство линейного электромагнитного движителя / Р.И. Бихман // Открытия. Изобретения. 2001. № 4.
6. Пат. 2172279 РФ. Устройство линейного электромагнитного движителя с разомкнутыми магнитопроводами / Р.И. Бихман // Открытия. Изобретения. 2001. № 23

*Журнал "Электротехника" переводится в США фирмой "ALLERTON PRESS, INC".  
Российское авторское общество (РАО) выплачивает гонорар в валюте авторам опубликованных в нашем журнале статей.*

*Справки по телефону: 203-35-33.*

*Адрес: 103670, Москва, ул. Б.Бронная, 6а, комн. 110.*

*Необходимо знать название статьи, год и номер журнала, страницы.*

## **НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ ШЕРЕМЕТЬЕВСКИЙ**

На 87 году жизни трагически погиб бывший генеральный директор НПП ВНИИЭМ, академик Академии наук Российской Федерации, лауреат Ленинской и Государственных премий, Герой Социалистического Труда, заслуженный деятель науки и техники РФ, кавалер многих других государственных наград, доктор технических наук, профессор Николай Николаевич Шереметьевский.

Н.Н.Шереметьевский родился 5 ноября 1916 г., окончил МЭИ, трудовую деятельность начал в 1939 г. во Всесоюзном электротехническом институте.

С сентября 1941 г. Н.Н. Шереметьевский работал во ВНИИЭМ. С 1955 г. он работал заместителем директора института, а с 1974 по 1991 гг. — директором и Генеральным конструктором. В последние годы Н.Н. Шереметьевский был советником Генерального директора НПП ВНИИЭМ.

Академик Н.Н. Шереметьевский внес значительный вклад в решение ряда крупных научно-технических проблем общегосударственного масштаба. Он принимал участие в разработке бортового электрооборудования тяжелого отечественного бомбардировщика, что положило основу отечественной авиационной электротехники.



Под его руководством созданы системы пространственной стабилизации и ориентации практически всех отечественных космических аппаратов и орбитальных станций, в том числе уникальных силовых гироскопов-гиродинов на магнитном подвесе, а также систем ориентации их солнечных батарей. Он — один из авторов многих изобретений в области автоматических систем и устройств, получивших широкое применение в космической технике.

Как ученый и организатор Н.Н. Шереметьевский принимал активное участие в разработках вычислительной техники во ВНИИЭМ, в том числе и создании автоматизированной информационно-управляющей системы "Скала" для отечественных АЭС с реакторами РБМК-1000, в разработке криогенных электрических машин и крупных роторных механизмов с электромагнитными подшип-

никами, систем электродвижения перспективных ледоколов, а также средств передвижной энергетики и систем автоматизированного проектирования электрооборудования.

Весьма плодотворной была работа по проблеме "Автоматизация", которую Н.Н. Шереметьевский в течение многих лет возглавлял в качестве научного руководителя в электротехнической отрасли.

В 1979 г. Н.Н. Шереметьевский был избран членом-корреспондентом, а в 1984 г. действительным членом АН СССР. Он являлся членом Бюро Отделения информатики, вычислительной техники и автоматизации РАН, действительным членом Академии электротехнических наук РФ и почетным членом Академии космонавтики им. К.Э.Циолковского. Н.Н. Шереметьевский возглавлял базовую кафедру кибернетических систем МИРЭА, действующую при ВНИИЭМ.

За разработку и внедрение новой техники Н.Н. Шереметьевский награждался многими государственными наградами.

Светлая память о Николае Николаевиче, ученом-изобретателе, замечательном и добром человеке навсегда сохранится в памяти его коллег, учеников, близких, друзей и широкого круга специалистов.

# ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» В 2003 Г.

|  |   |    |
|--|---|----|
| Абрамович Б.Н., Козярук А.Е., Рудаков В.В., Шклярский Я.Э. Кафедре электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского Государственного Горного института – первого технического вуза России –110 лет..... | 5 | 9  |
| Клепиков В.Б., Шамардина В.Н. К 135-летию Павла Петровича Копняева – основоположника Украинской электротехнической школы.....  | 3 | 70 |
| Ковчин С.А., Козярук А.Е., Сабинин Ю.А. Электротехника Санкт-Петербурга и ее научные школы за 300 лет (краткий исторический обзор).....  | 5 | 3  |
| Тюков В.А. Развитие научных направлений на электромеханическом факультете Новосибирского государственного технического университета.....   | 9 | 2  |
| Шидловский А.К. К читателям журнала.....   | 3 | 2  |

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

|  |    |    |
|--|----|----|
| Абдуллаев Я.Р. Расчет магнитных систем с левитационными обмотками.....   | 7  | 52 |
| Алимходжаев К.Т. Взаимное влияние электромагнитных и механических переходных процессов в асинхронных вибродвигателях.....  | 8  | 20 |
| Волокитина Е.В., Свиридов В.И., Шалагинов В.Ф. Особенности применения постоянных магнитов в вентильных электродвигателях авиационных электроприводов.....          | 7  | 55 |
| Глазунов В.Ф., Пикунов В.В., Митрофанов А.С. Методика определения параметров электродвигателя с осевым полем от постоянных магнитов.....                           | 12 | 7  |
| Глухенький Т.Г. К расчету минимальной индуктивности фазы в индукторных электродвигателях.....  | 10 | 15 |
| Голландцев Ю.А. Уравнения вентильного индукторно-реактивного двигателя при одиночной коммутации фаз.....   | 7  | 45 |
| Голубев А.Н., Зыков В.В. Математическая модель асинхронного двигателя с многофазными обмотками статора и ротора.....   | 7  | 35 |
| Данилевич Я.Б. Современные проблемы электромашиностроения.....   | 7  | 32 |
| Кади-Оглы И.А. Пожаро-взрывобезопасные турбогенераторы нового поколения средней мощности.....  | 5  | 40 |
| Караваев В.Т. Магнитогидродинамическая машина.....   | 2  | 36 |
| Кузнецов В.А., Ширинский С.В. Синхронный генератор с гибридным возбуждением.....   | 10 | 2  |
| Кучинская З.М. Применение немагнитных щек полюсов ротора гидрогенератора.....  | 7  | 60 |
| Логинов А.Г. Системы возбуждения турбо- и гидрогенераторов ОАО "Электросила".....  | 5  | 43 |
| Малыгин В.М. Анализ теоретического обоснования возможности создания линейного электромагнитного движителя.....   | 2  | 42 |
| Мощинский Ю.А., Петров А.П. Математическая модель несимметричного асинхронного двигателя на основе схем замещения для переходных режимов.....                      | 2  | 24 |
| Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулированием магнитной энергии в динамических режимах..... | 2  | 30 |
| Петько В.Г., Садчиков А.В. Устройство защиты трёхфазного электродвигателя от асимметрии питающего напряжения.....  | 10 | 5  |
| Пинский Г.Б. Гидрогенераторостроение в ОАО "Электросила".....  | 5  | 34 |
| Смирнов А.Ю. Совершенствование индукторной машины для исполнительных механизмов вертикального перемещения.....   | 10 | 10 |
| Сонин Ю.П., Гуляев И.В., Атаманкин Д.В. Бесконтактный асинхронизированный вентильный двигатель с ортогональным управлением.....                                    | 7  | 41 |
| Хрисанов В.И., Бржезинский Р. Вопросы адекватности математических моделей асинхронных двигателей при анализе переходных процессов пуска.....                       | 10 | 20 |
| Шабаетов В.А., Захаров А.В. Экспериментальное исследование двухфазных неререверсивных вентильно-индукторных двигателей.....  | 2  | 44 |
| Шидловский А.К., Федоренко Г.М. Ключевые вопросы развития генераторостроения на Украине.....   | 3  | 6  |

## ЭЛЕКТРОПРИВОД

|   |    |    |
|---|----|----|
| Абрамов Б.И., Демиденко В.И., Коган А.И., Моцохейн Б.И., Парфенов Б.М., Портной Т.З. К вопросу о выборе вида электропривода для одноковшовых экскаваторов в современных условиях.....   | 12 | 43 |
| Акимов Л.В., Воинов В.В., Долбня В.Т., Пирожок А.В. Синтез полиномиальным методом с использованием цепных дробей регулятора скорости для исходно-неустойчивого ДЭМО с электроприводом ТПН-АД.....                             | 3  | 20 |
| Акимов Л.В., Долбня В.Т. Об особенностях использования цепных дробей для аналитического упрощения передаточных функций электромеханических систем.....  | 12 | 11 |
| Акимов Л.В., Долбня В.Т., Пирожок А.В. Синтез статических регуляторов положения для двухмассового электропривода ТРН-АД с нелинейной нагрузкой.....   | 2  | 12 |
| Аносов В.Н., Гуревич В.А., Кавешников В.М. Синтез оптимального силового фильтра в системе тягового электропривода.....  | 9  | 30 |
| Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н., Сушников А.Л. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов.....   | 5  | 12 |
| Бень Е.А., Скворцов Б.А., Ткач Д.Б., Токарев Л.Н. Особенности частотного управления асинхронным двигателем без датчика частоты вращения в тяговом электроприводе троллейбуса.....   | 2  | 20 |
| Бочкарев И.В., Гунина М.Г., Свечкаренко Д.В. Разработка схем управления и расчет переходных и квазиустановившихся режимов работы быстродействующих электромеханических тормозных устройств для станочных электроприводов..... | 7  | 17 |
| Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом.....  | 7  | 7  |
| Волков А.В. Оптимальное по быстродействию векторное регулирование статорного тока в частотно-управляемых асинхронных электроприводах с широтно-импульсной модуляцией.....   | 12 | 34 |
| Герасимьяк Р.П., Таньков А.А. Статические и динамические режимы замкнутой системы асинхронного электропривода с преобразователем напряжения.....  | 3  | 52 |
| Геча В.Я., Аронзон А.Н., Канунникова Е.А. Динамика трехкомпонентного привода солнечных батарей с упругими элементами.....   | 2  | 7  |
| Гиммельман В.Г., Золотарев В.Ф., Постников Ю.В., Соколовский Г.Г. Основные аспекты построения следящих электроприводов крупного радиотелескопа.....   | 5  | 17 |
| Демидов С.В. Электромеханические системы управления тяжелыми металлорежущими станками станкостроительного завода им. Свердлова.....   | 5  | 21 |
| Дробкин Б.З., Карзунов Р.А., Крутяков Е.А., Павлов П.А., Пронин М.В. Высоковольтные тиристорные преобразователи частоты ОАО "Электросила".....  | 5  | 30 |
| Жемеров Г.Г., Крылов Д.С. Энергосберегающие преобразователи переменного напряжения в постоянное с близким к единице коэффициентом мощности.....   | 4  | 2  |
| Зеленов А.Б., Мотченко А.И., Полилов Е.В., Щёлоков А.Г. Практическая реализация релейных алгоритмов управления электроприводом на универсальном лабораторном макете.....  | 3  | 48 |
| Зюзов А.М., Липанов В.М., Метельков В.П., Поляков В.Н., Попов А.С., Шутько В.Ф. Программный комплекс для исследования эксплуатационных режимов электроприводов буровых установок.....   | 7  | 25 |
| Клепиков В.Б. К итогам конференций "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика".....  | 3  | 2  |
| Клепиков В.Б., Полянская И.С. Квазинейрорегулирование двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением.....  | 3  | 29 |
| Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Губарь Ю.В., Мариничев В.Ю. Сравнительный анализ астатических цифровых систем управления приводами постоянного тока с наблюдателями состояния.....  | 3  | 44 |
| Кузнецов Б.И., Чаусов А.А., Кузнецова Т.Б. Ограничение переменных состояния при оптимальном управлении электромеханическими системами.....  | 3  | 37 |

|  |    |    |
|--|----|----|
| Лозинский О.Ю., Марущак Я.Ю. Синтез электромеханических систем с использованием обобщенного характеристического полинома.....  | 3  | 25 |
| Нейман В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий.....   | 9  | 25 |
| Осичев А.В., Котляров В.О. Особенности динамики двухмассовых электромеханических систем с регуляторами состояния при учете волновых процессов в кинематической цепи.....     | 3  | 57 |
| Панкратов В.В., Зима Е.А. Математическое моделирование асинхронных электрических машин и машин двойного питания.....   | 9  | 19 |
| Пивняк Г.Г., Бешта А.С. Идентификация параметров в системах информационного обеспечения этапов эксплуатации и ремонта электропривода.....                                    | 3  | 17 |
| Попович Н.Г., Печеник Н.В., Ковальчук А.В., Киселичник О.Н. Особенности экстремальных электромеханических систем автоматического управления и задача энергосбережения.....   | 3  | 12 |
| Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Фильтрация многофазных нестационарных неопределенных гармонических сигналов.....  | 3  | 55 |
| Родькин Д.И. Декомпозиция составляющих мощности полигармонических сигналов.....  | 3  | 34 |
| Садовой А.В., Волянский Р.С. Оптимальное управление асинхронным следящим электроприводом с люфтом в кинематической цепи.....   | 3  | 40 |
| Симаков Г.М., Гринкевич Д.Я. Двухзонный транзисторный электропривод постоянного тока с реверсивным преобразователем в цепи возбуждения.....                                  | 9  | 39 |
| Синчук О.Н., Чумак В.В., Михайлов С.Л. Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок.....                                      | 3  | 61 |
| Сокол Е.И., Архиреев И.П., Клипенский А.В., Король Е.И. Улучшение показателей и характеристик однофазных полупроводниковых преобразователей переменного напряжения.....      | 3  | 66 |
| Тютиков В.В., Тарарыкин С.В., Варков Е.А. Дискретное модальное управление динамическими системами с заданной статической точностью.....                                      | 7  | 2  |
| Тютиков В.В., Тарарыкин С.В., Красильникъянц Е.В., Салахутдинов Н.В. Синтез систем модального управления заданной статической точности.....                                  | 2  | 2  |
| Худяев А.А., Гвоздева Е.В. Оценка эффективности параметрически оптимальных итерационных двухканальных систем управления.....   | 4  | 8  |
| Чермалых А.В., Кузнецов В.В. Фаззи-управление асинхронным электроприводом с тиристорным регулятором тока ротора и задающей моделью.....                                      | 4  | 12 |
| Шестаков В.М., Алексеев Д.В., Епишкин А.Е., Нагибина О.Л. Оптимизация динамических режимов работы взаимосвязанных электромеханических систем испытательных вибростендов..... | 5  | 25 |
| Шетат Б., Ходжа Дж. Использование искусственных нейронных сетей для диагностики неисправности асинхронного электропривода в режиме реального времени.....                    | 12 | 16 |

## ИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

|   |   |    |
|---|---|----|
| Драчев А.И., Пак В.М., Гильман А.Б., Кузнецов А.А. К вопросу об увеличении длительной электрической прочности композиционного электроизоляционного материала с полиэтилентерефталатной пленкой ПЭТ-Э..... | 4 | 35 |
| Драчев А.И., Пак В.М., Гильман А.Б., Кузнецов А.А. Поляризация пленок полиэтилентерефталата в электрическом поле.....   | 4 | 39 |
| Левин С.М., Ножевникова Т.Е., Казакова Н.Ю., Лавкин Н.Е. Перспективы совершенствования систем изоляции тяговых электрических машин.....   | 4 | 31 |
| Пантелеев Ю.А. Термостарение и доотверждение как факторы, влияющие на восстановленное напряжение композиционных материалов для электрических машин.....   | 4 | 42 |

|   |   |    |
|---|---|----|
| Петров В.В., Погодина Ж.П., Левин С.М., Лавкин Н.Е. Совершенствование изоляции турбогенераторов и крупных электрических машин, изготавливаемой по технологии вакуум-нагнетательной пропитки.....                      | 4 | 28 |
| Пинчук Н.Д., Пинский Г.Б., Петров В.В., Погодина Ж.П., Куимов И.Е., Папков А.В., Пак В.М. Разработка и внедрение новых электроизоляционных материалов и систем термореактивной изоляции турбо-, гидрогенераторов..... | 4 | 17 |

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

|  |   |    |
|--|---|----|
| Аванесова Г.М., Аванесов В.М. Частотные характеристики следящего инвертора с асинхронной ШИМ.....  | 6 | 28 |
| Агунов А.В. Улучшение электромагнитной совместимости в автономных электроэнергетических системах ограниченной мощности методом активной фильтрации напряжений.....                             | 6 | 52 |
| Григораш О.В., Бобылев Е.Н., Мельников Д.В. К вопросу оценки качества выходного напряжения непосредственных преобразователей частоты высокочастотных автономных источников электроэнергии..... | 6 | 48 |
| Долкарт В.М. Последовательная локальная шина ввода-вывода PCI Express третьего поколения с низковольтной дифференциальной передачей сигналов LVDS.....   | 6 | 16 |
| Ивакин В.Н. Исследование характеристик управляемой продольной компенсации как устройства для регулирования потоков мощности гибких линий электропередачи переменного тока.....                 | 6 | 56 |
| Ишматов З.Ш. Использование метода полиномиальных уравнений для синтеза микропроцессорных систем управления электроприводами.....   | 6 | 33 |
| Флоренцев С.Н. Силовая электроника начала тысячелетия.....   | 6 | 3  |
| Хрисанов В.И., Бржезинский Р. Анализ состояния и перспектив развития силовой электроники и электропривода (по материалам международной конференции EPE-PEMC'2002).....                         | 6 | 10 |
| Шрейнер Р.Т., Кривовяз В.К., Калыгин А.И. Координатная стратегия управления непосредственными преобразователями частоты с ШИМ для электроприводов переменного тока.....                        | 6 | 39 |

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

|   |    |    |
|---|----|----|
| Дизендорф Э.А. Новый тип резонансного инвертора.....  | 8  | 57 |
| Иванов А.М., Иванов С.А. Комбинированные энергоустановки с ИКЭ – основа эффективного использования топливно-энергетических ресурсов XXI века..... | 12 | 2  |

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

|  |   |    |
|--|---|----|
| Агунов А.В. Статический компенсатор неактивных составляющих мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки.....               | 2 | 47 |
| Бочкарев И.В. Повышение быстродействия замыкания электромеханических тормозных устройств для электродвигателей.....                                    | 2 | 58 |
| Гаранин А.Ю., Силаева Е.В., Шлегель О.А., Попенко В.Н. Расчет тягового усилия электромагнита постоянного тока.....                                     | 2 | 55 |
| Шлегель О.А., Горшков Б.М., Гаранин А.Ю., Попенко В.Н. Учет вихревых токов при расчете динамических характеристик электромагнита постоянного тока..... | 2 | 51 |

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

|  |    |    |
|--|----|----|
| Богуславский И.З., Кусе Г. Об уровне и критериях оценки электромагнитного использования машин переменного тока в нелинейных сетях.....                               | 10 | 48 |
| Кокорин С.А., Ней Е.Е., Новиков В.К. Системы измерения качества электроэнергии на базе промышленно выпускаемых средств автоматизации.....                            | 10 | 44 |
| Минуллин Р.Г., Закамский Е.В., Андреев В.В. Исследования условий отражения импульсных сигналов в распределительных электрических сетях с древовидной топологией..... | 10 | 39 |



|  |    |    |  |    |    |
|--|----|----|--|----|----|
| Солдатов В.А., Попов Н.М. Моделирование сложных видов несимметрии в распределительных сетях 10 кВ методом фазных координат.....  | 10 | 35 | Сведения об авторах опубликованных статей.....   | 5  | 70 |
| Шакиров М.А. Системные схемы замещения трёхфазных машин и их применение для расчёта несимметричных режимов электрических систем.....   | 10 | 26 | Сивков А.А., Корольков Л.В., Сайгаш А.С. Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью магнитоплазменного ускорителя.....   | 8  | 41 |
| <b>ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ТЕХНИКА</b>  |    |    |  |    |    |
| Алфёров Д.Ф., Будовский А.И., Иванов В.П., Иванов Ю.В., Сидоров В.А. Однофазные вакуумные контакторы постоянного и переменного тока.....   | 11 | 51 | <b>УПРАВЛЯЕМЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ</b>  |    |    |
| Алфёров Д.Ф., Будовский А.И., Иванов В.П., Сидоров В.А. Сильноточный быстродействующий короткозамыкатель.....  | 11 | 56 | Базылев Б.И., Брянцев М.А., Спиридонов Ю.П. Вопросы проектирования управляемых подмагничиванием дугогасящих реакторов для электрических сетей 6, 10 кВ.....  | 1  | 41 |
| Алфёров Д.Ф., Матвеев Н.В., Сидоров В.А., Хабаров Д.А. Высоковольтное быстродействующее шунтирующее устройство.....  | 11 |    | Брянцев А.М. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы – как элемент электроэнергетической системы.....  | 1  | 2  |
| Бабкин И.В., Берлин Б.Е., Вишневский Ю.И., Лопаев В.Н., Третьяков С.В. Комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией.....  | 11 | 23 | Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Дубровина О.М. Способы и алгоритмы управления мощностью трехфазного управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием.....  | 1  | 35 |
| Белкин Г.С. Адаптивные методы определения коммутационных характеристик выключателей.....   | 11 | 12 | Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Липатов Ю.А., Лурье А.И., Маклецова Е.Е. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для сети 35–500 кВ.....  | 1  | 5  |
| Белкин Г.С., Вариводов В.Н. Перспективы развития коммутационной аппаратуры высокого напряжения.....  | 11 | 5  | Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Лурье А.И., Зильберман С.М., Бики М.А., Уколов С.В. Трёхфазный шунтирующий управляемый реактор мощностью 100 МВ.А, 220 кВ на подстанции "Чита" МЭС Сибири.....  | 1  | 22 |
| Берлин Б.Е., Вишневский Ю.И., Пельц А.С., Тонконогов Е.Н., Ярмаркин М.К. Оптимизация дугогасительных устройств высокого напряжения в режиме коммутации емкостных токов.....  | 11 | 18 | Долгополов А.Г. Способы автоматической настройки дугогасящих реакторов с подмагничиванием.....   | 1  | 59 |
| Бурман А.П., Савваитов Д.С. Состояние высоковольтного оборудования в Единой национальной электрической сети.....   | 11 | 2  | Долгополов А.Г., Долгополов С.Г., Зайцев А.И., Шипицин В.П. Три года промышленной эксплуатации управляемого подмагничиванием трехфазного шунтирующего реактора 110 кВ, 25000 кВ ·А на подстанции "Кудымкар" Пермэнерго.....            | 1  | 30 |
| Егоров В.Г., Колобанова Н.Н., Торопчин Ю.В., Чемерис В.С. Разработка элегазовых выключателей для КРУЭ на 170 кВ и 362 кВ.....  | 11 | 28 | Жакутова С.В. Управляемые шунтирующие реакторы для компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения в электрических сетях ЕЭС республики Казахстан.....  | 1  | 18 |
| Зорин Л.М., Подъячев В.Н., Шлейфман И.Л. Генераторные выключатели в цепи мощных энергоблоков и требования, предъявляемые к ним.....  | 11 | 34 | Лурье А.И., Панибратец А.Н., Зенова В.П. Электродинамическая стойкость при КЗ управляемых подмагничиванием дугогасящих реакторов типа РУОМ.....  | 1  | 52 |
| Легостов В.В., Дорошев К.И. Комплектные устройства ОАО "Мосэлектросит".....  | 11 | 46 | Лурье А.И., Панибратец А.Н., Зенова В.П., Елагин В.Н., Базылев Б.И. Серия нейтралеров типа ФМЗО для работы с управляемыми подмагничиванием дугогасящими реакторами серии РУОМ в распределительных сетях с изолированной нейтралью..... | 1  | 46 |
| Перцев А.А., Белкин Г.С., Рыльская Л.А. Коммутационные процессы в вакуумных выключателях с параллельным соединением дугогасительных камер.....   | 11 | 39 | Пекелис В.Г., Чашкина С.Ю. К вопросу об эффективности применения управляемых шунтирующих реакторов большой мощности.....   | 1  | 13 |
| <b>ТРАНСФОРМАТОРЫ</b>  |    |    |  |    |    |
| Иванченко О.Н., Эндик В.А. К расчету перехода магнитного потока через границу двух сред с учетом анизотропии среды.....  | 8  | 12 | <b>ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ</b>  |    |    |
| Караваев В.Т., Запольских С.Н., Данецкий А.Н. Импульсный трансформатор с магнитным сопротивлением (ИМС).....   | 8  | 2  | Алимходжаев К.Т. Взаимное влияние электромагнитных и механических переходных процессов в асинхронных вибродвигателях.....  | 8  | 20 |
| Попов Г.В., Ватлецов А.В., Аль-Хамри С.С. Экспертная поддержка при диагностике состояния силовых трансформаторов.....  | 8  | 5  | Бородин А.М., Шевченко А.Ф., Нестеренко В.М., Новгородцев С.С. Разработка электромеханической системы испытательного стенда для электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля... ..                                    | 9  | 45 |
| <b>ТЕХНОЛОГИЯ</b>  |    |    |  |    |    |
| Абрамович Б.Н., Кабанов С.О., Красавина М.А., Полищук В.В. Ограничители перенапряжений – важнейший элемент обеспечения электромагнитной совместимости.....   | 5  | 66 | Вилькин М.А., Семёнов Ю.И., Никифоров Ю.Н. Исследование структуры и электросопротивления коллекторных плёнок, образованных щётками на основе твёрдых смазок с различной электропроводностью....  | 12 | 24 |
| Безменов Ф.В., Иванов В.Н. Высоочастотные электро-технологии.....  | 5  | 53 | Власов А.Б. Определение гамма-процентного ресурса контактных соединений по данным тепловизионной диагностики.....  | 8  | 25 |
| Васильев А.С., Демидович В.Б. Перспективы применения индукционного нагрева в металлургической промышленности.....  | 5  | 58 | Власов А.Б. Прогнозирование долговечности контактных соединений по данным тепловизионной диагностики.....  | 12 | 27 |
| Загривный Э.А., Козырук А.Е., Батаев С.Н. Электро-термический комплекс на основе скважинного электродного нагревателя мощностью более 500 кВт для теплового воздействия на продуктивный пласт высоковязкой нефти.....          | 5  | 61 | Власов А.Б. Факторный анализ показателей надежности контактных соединений по данным тепловизионного контроля.....  | 4  | 51 |
| Минеев А.Р., Игнатов И.А., Попов В.Н., Дмитриев И.Ю. Варианты конструкций электротермических установок для электрошлаковой очистки поверхности слитков в зависимости от метода восполнения расходаемой на очистку энергии..... | 12 | 51 | Ворфоломеев Г.Н., Щуров Н.И., Мятёж С.В., Евдокимов С.А. Источник постоянного напряжения с шестнадцатикратной частотой пульсации.....  | 9  | 34 |
| Пинчук Н.Д., Рыбаков В.Л., Антонюк О.В. Высокоэффективные технологии в ОАО "Электросила".....  | 5  | 48 | Григорьев А.В., Осотов В.Н. Диагностика в технике. Понятия, цели, задачи.....  | 4  | 46 |

|   |    |    |
|---|----|----|
| Григорьев А.В., Семёнов Д.Ю., Осотов В.Н., Ямпольский Д.А. Исследование вибромеханических характеристик пакета электротехнической стали и возможности их использования для контроля прессовки сердечника статора турбогенератора..... | 8  | 36 |
| Гуль А.И. Балансировка добротности и запаса устойчивости электромеханических систем .....   | 4  | 55 |
| Казakov Ю.Б., Сайкин М.С., Щелыкалов Ю.Я. Учёт перераспределения ферромагнитных частиц в магнитной жидкости, находящейся в неоднородном магнитном поле герметизатора .....  | 12 | 20 |
| Киселев А.Н. Оптимизация численной обработки сигнала потребляемого тока при работе активного фильтра.....   | 10 | 60 |
| Лобунец О.Д. О природе импульсов перенапряжения в магнитополупроводниковых устройствах .....  | 10 | 62 |
| Малахов А.П. Высокочастотные электродинамические вибросейсмоисточники .....   | 9  | 58 |
| Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Физические характеристики поляризованных сред, обусловленные релаксационными процессами .....   | 9  | 10 |
| Нархинов В.П., Семёнов А.П., Балханов В.К. Особенности формирования радиально сходящегося пучка электронов из плазмы отражательного разряда с полыми катодами и общим анодом в магнитном поле ....                                    | 10 | 55 |
| Свентицкий И.И. Закон электромагнитной инерции Ленца и феноменальные принципы физики.....   | 8  | 16 |
| Сопов В.И., Щуров Н.И., Прокушев Ю.А., Штанг А.А. Реактивная мощность при регулировании мощности тяговой подстанции.....  | 9  | 53 |
| Чередниченко В.С., Снегирёва Г.В., Хацевский К.В. Индукционные установки для нагрева и электрофизической обработки жидкостей в электромагнитных полях.....  | 9  | 4  |
| Чередниченко М.В., Грамолин А.В., Шкрет С.П. Согласование параметров источников питания и электрических режимов работы вакуумных плазмотронов с полыми катодами .....   | 9  | 48 |
| Шевченко А.Ф., Медведко А.С., Бухгольц Ю.Г., Сингатулин Ш.Р., Скоробогатов Д.Н., Ерохин А.И. Стартер-генераторное устройство для легковых автомобилей класса ВАЗ-2110.....  | 9  | 15 |
| Шишкин С.А. Построение схем измерения входных параметров регуляторов реактивной мощности конденсаторных установок.....  | 10 | 52 |
| Якимец И.В., Шевцов М.В. Определение эквивалентных параметров энергосистемы в процессе её динамического перехода .....  | 8  | 29 |

## АККУМУЛЯТОРЫ

|  |   |    |
|--|---|----|
| Баюнов В.В., Барсукова М.М., Подалинский Ю.А., Коликова Г.А. Влияние температуры на поляризационное сопротивление герметизированных свинцовых аккумуляторов .....  | 8 | 50 |
| Кривченко Г.В., Юдильевич С.Р., Коликова Г.А. Влияние некоторых органических расширителей на характеристики отрицательного электрода свинцового аккумулятора ..... | 8 | 53 |
| Скачков Ю.В., Колосовский В.В., Белоусов О.А. Пути повышения напряжения топливных элементов.....   | 8 | 46 |

## НАУЧНЫЕ ГИПОТЕЗЫ

|   |    |
|---|----|
| Копылов И.П. Гелиоэлектромеханика и солнечные циклы ..... | 12 |
|---|----|

## ДИСКУССИЯ

|  |    |    |
|--|----|----|
| Бихман Р.И., Долкерт В.М. К вопросу о создании линейного электромагнитного двигателя ..... | 12 | 57 |
|--|----|----|

## ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

|   |    |    |
|---|----|----|
| Сивяков С.К. Вакуумные коммутационные аппараты нового поколения .....                       | 12 | 54 |
| Фёдоров А.М., Кукла К. Опыт применения автоматических выключателей чешского завода OEZ..... | 4  | 63 |

## ХРОНИКА

|  |   |    |
|--|---|----|
| В академии электротехнических наук РФ .....  | 8 | 61 |
| Техническая экспертиза на проект "Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для электрических сетей 35–500 кВ" ..... | 1 | 64 |

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ

|                               |    |    |
|-------------------------------|----|----|
| Юрий Алексеевич Сабинин ..... | 11 | 65 |
| Феликс Иванович Ковалёв ..... | 12 | 65 |

## НЕКРОЛОГИ

|  |    |    |
|--|----|----|
| Вадим Борисович Козлов .....             | 7  | 65 |
| Лев Николаевич Рассудов .....            | 10 | 65 |
| Николай Николаевич Шереметьевский .....  | 12 | 60 |
| Памяти Владимира Ивановича Ключева ..... | 2  | 65 |

Журнал "Электротехника" распространяется по подписке — через АРЗИ (г.Москва) по объединенному каталогу Департамента почтовой связи Министерства связи Российской Федерации (подписной индекс — 71111) и через Роспечать (подписной индекс — 82434).

Подписаться на журнал можно также и в редакции журнала.

Справки по телефону 361-95-96.

В редакции можно купить и отдельные номера за прошлые и нынешний годы.

# Феликс Иванович Ковалёв

(к 75-летию со дня рождения)

20 декабря 2003 г. исполняется 75 лет доктору технических наук, профессору Феликсу Ивановичу Ковалёву.

Ф.И.Ковалёв в 1952 г. с отличием окончил Московский энергетический институт. Работал младшим, а затем старшим научным сотрудником в Энергетическом институте (ЭНИН) имени Г.М.Кржижановского. В 1966 г. перешёл на работу в ВЭИ, где работал до 1986 г. заведующим сектором, начальником отдела, заместителем директора.

В 70–80-е годы Феликс Иванович был Главным конструктором преобразовательного оборудования для производств обогащения урана методом ультрацентрифугования и Главным конструктором агрегатов бесперебойного питания для атомной энергетики и промышленности.

С 1986 по 1992 гг. Ф.И. Ковалёв — начальник отдела Научно-технического института межотраслевой информации. С 1992 г. работал в Ассоциации "Научно-промышленный консорциум "Ин-



теллектуальная силовая электроника".

Ф.И.Ковалев без отрыва от производства в 1960 г. защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук, а в 1983 г. — доктора технических наук. В 1988 г. ему присвоено звание профессора. В 1993 г. Ф.И. Ковалев избран действительным членом Российской Академии электротехнических наук. С 1993 г. — он член Института инженеров электриков и электронщиков (IEEE).

Ф.И.Ковалёв является одним из основателей и первым Президентом Ассоциации инженеров силовой электроники. Он председатель Совета учредителей

журнала "Электротехника".

Сфера научных интересов Ф.И. Ковалёва — силовая электроника. Он внёс заметный вклад в становление и развитие силовой электроники как научно-технического направления. Ф. И. Ковалев является автором более 200 научных работ, в том числе семи монографий.

По инициативе Ф.И. Ковалева термин "силовая электроника" получил официальный статус и утвержден в качестве научной специальности.

Большое внимание Ф.И. Ковалёв уделял подготовке научных и инженерных кадров. Среди его учеников видные специалисты — доктора и кандидаты наук, работающие не только в России, но и в странах СНГ.

Редакционная коллегия и редакция журнала "Электротехника" сердечно поздравляют Феликса Ивановича Ковалёва с 75-летием со дня рождения и желают ему хорошего здоровья, счастья, дальнейших творческих успехов в научной и производственной деятельности.

## **Ежемесячный научно-технический журнал. Издаётся с января 1930 г.**

Научно-технический журнал "Электротехника" более 70 лет активно способствует развитию электротехнической промышленности.

Публикуя теоретические статьи, освещающие существующие проблемы, и статьи по результатам исследований новых типов электротехнического оборудования журнал даёт возможность специалистам, занятым созданием и применением низковольтной аппаратуры, силовых полупроводниковых приборов, преобразовательных устройств, трансформаторов, высоковольтной техники, электрических машин, электроприводов и систем управления использовать новейшие достижения в своих разработках.

Публикуемая на страницах журнала реклама продукции, выпуск специальных номеров журнала по тематике и материалам ( в том числе рекламным ) заказчика, помогут Вам найти надёжных партнёров как у нас в стране, так и за рубежом.

Журнал является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ. Журнал "Электротехника" входит в "Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертационных исследований на соискание учёной степени доктора наук".

Журнал "Электротехника" распространяется по подписке в странах СНГ, ближнем и дальнем зарубежье – через АРЗИ (г. Москва) по объединённому каталогу Департамента почтовой связи Министерства связи Российской Федерации (подписной индекс — 71111) и через Роспечать (подписной индекс – 82434).

"Электротехника" переводится на английский язык и выходит в США в издательстве "ALLERTON PRESS, INC" в полном объёме.

***Приглашаем Вас к активному сотрудничеству.  
Будем рады видеть Вас среди авторов, подписчиков и  
рекламодателей нашего журнала.***

Редакция журнала "Электротехника":  
111250, Москва, Красноказарменная, 12.

Факс/телефон: 361-95-96, E-mail [elektrotechnika@mtu-net.ru](mailto:elektrotechnika@mtu-net.ru)

Вологодская областная универсальная научная библиотека

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