

ISSN 0013-5380

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1998

2

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Секция теоретических основ электротехники, преобразовательной техники, электротехнических материалов

Бутырин П.А. (Объединенный институт высоких температур РАН), председатель секции, Булатов О.Г. (Московский энергетический институт), Козлов В.Н. (С.-Петербургский государственный технический университет), Лагарьков А.Н. (Объединенный институт высоких температур РАН), Макарышин Б.Д., ответственный секретарь редакции, Миронов В.Г. (Московский энергетический институт), Нетушил А.В. (Московская государственная академия тонкой химической технологии), Розанов Ю.К. (Московский энергетический институт), Тареев Б.М. (Институт научной и технической информации РАН), Чечурин В.Л. (С.-Петербургский государственный технический университет).

Научный редактор — Макарышин Б.Д.

Секция электроэнергетики

Строев В.А., главный редактор, председатель секции (Московский энергетический институт), Дьяков А.Ф. (Корпорация «Единый электроэнергетический комплекс РФ»), Железко Ю.С. (Научно-исследовательский институт электроэнергетики), Ишкын В.Х. (РАО «ЕЭС России»), Кощеев Л.А. (Научно-исследовательский институт постоянного тока), Мамкошьянц Л.Г. (Научно-исследовательский институт электроэнергетики), Никитин О.А. (РАО «ЕЭС России»), Семенов В.А. (ЦДУ ЕЭС России).

Научный редактор — Кудинова Л.С.

Секция техники высоких напряжений, электрических аппаратов, трансформаторов

Ларпонов В.П., председатель секции (Московский энергетический институт), Александров Г.Н. (С.-Петербургский государственный технический университет), Белкин Г.С. (Всероссийский электротехнический институт), Лоханин А.К. (Всероссийский электротехнический институт), Митькин Ю.А. (Ивановский энергетический университет).

Научный редактор — Кудинова Л.С.

Секция электрических машин

Иванов-Смоленский А.В., председатель секции (Московский энергетический институт), Бут Д.А. (Московский государственный авиационный институт), Данилевич Я.Б. (Отдел (институт) электроэнергетических проблем РАН), Евсеев Б.Н., заместитель главного редактора журнала, Шакарян Ю.Г. (Научно-исследовательский институт электроэнергетики).

Научный редактор — Евсеев Б.Н.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

2
ФЕВРАЛЬ
1998

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (Отделение физико-технических проблем энергетики),
ФЕДЕРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ

СОДЕРЖАНИЕ

Окин А.А., Портной М.Г., Тимченко В.Ф. Об обеспечении надежности параллельной работы Евро-Азиатского объединения энергосистем	2
Беляев Л.С., Воропай Н.И., Подковал'ников С.В., Шутов Г.В. Проблемы формирования межгосударственного энергообъединения Восточной Азии	15✓
Филиппов С.А., Капишникова Т.В. Применение регрессионных моделей для оценки потерь электроэнергии от межсистемных перетоков	22
Пономаренко И.С., Дерий И.А. Определение оптимальных мест размыкания в распределительных сетях	25
Рубинраут А.М., Бурбасева Н.В., Веселовский А.С., Зенкевич В.Б., Кир'янин И.А. Работа линейного синхронного электродвигателя от сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии	28
Калужский Д.Л. Методы анализа многофазных электрических машин	38
Сивокобыленко В.Ф., Краснокутская Г.В. Управление возбуждением синхронного двигателя в режимах пуска и ресинхронизации	44
Бургин Б.Ш. Синтез двухмассовой электромеханической системы стабилизации момента в упругом звене	49
Усов Н.А., Антонов А.С., Дыхне А.М., Лагар'ков А.Н. К теории доменной структуры аморфного провода на основе кобальта	55
Снарский А.А., Буда С.И. Универсальная функция эффективной проводимости двухфазной слабо нелинейной среды вблизи порога протекания	67

ДИСКУССИИ

Нетушил А.В. О математических моделях трансформаторов (статья Китаева А.В., «Электричество», 1997, № 7)	73
От редакции	73

ХРОНИКА

Герасимов В.Г. От Академии электротехнических наук РФ	74
Анатолий Петрович Меренков (Некролог)	80

CONTENTS

Okin A.A., Portnoi M.G., Timchenko V.F. On Ensuring the Reliability of the Parallel Operation Euro-Asian Interconnected System	2
Belyaev L.S., Voropai N.I., Podkovaal'nikov S.V., Shutov G.V. Directions and Problems of Formation of the Interstate Power Pool of Eastern Asia	15
Filippov S.A., Kapishnikova T.V. Application of Regression Models for Estimating Losses Due to Power Flows	22
Ponomarenko I.S., Derii I.A. Determining Normal Cuts in Distribution Networks of Electrical Power Supply Systems	25
Rubindraut A.M., Burbayeva N.V., Veselovskii A.S., Zenkevich V.B., Kir'yenin I.A. Operation of Linnear Sunchronous Electrical Motor Supplied from a Superconducting Inductive Energy Storage	28
Kaluzhskii D.L. Methods for an Analysis Multi-Phase Electrical Machines	38
Sivokobylenko V.F., Krasnokutskaya G.V. Controlling Exititation of a Synchronous Motor under Starting and Resynchronizing Regimes	44
Burgin B.Sh. Synthesis of the Two-Mass Electromechanical System of the Shaft Torque Stabilization	49
Usov N.A., Antoniv A.S., Dyhne A.M., Lagar'kov A.N. Theory of the Domain Structure of Co-Rich Amorphous Wire	55
Snarskii A.A., Buda S.I. Universal Function of Effective Conductivite of Two-Phase weakly Non-Linear Medium near the Percolation Threshold	67

DISCUSSIONS

Netushil A.V. — The Article of Kitayev A.V. («Elektrichestvo», 1997 № 7)	73
--	----

CHRONICLE

Gerasimov V.G. From Academy of Electrotechnical Sciencs of Russian Federation	74
Anatolii Petrovich Merenkov (Notice Obituary)	80

Об обеспечении надежности параллельной работы Евро-Азиатского объединения энергосистем

ОКИН А.А., ПОРТНОЙ М.Г., ТИМЧЕНКО В.Ф.

Оценки колебаний обменной мощности и частоты, которые вероятны в случае соединения линиями переменного тока энергообъединений стран Европы и СНГ при разной организации автоматического регулирования их режимов, получены на основе обобщения результатов многолетних статистических исследований. Пропускная способность совокупности уже имеющихся в настоящее время линий 220—380—750 кВ переменного тока UCPTE-CENTREL (ОЭС Восточной Европы) — ОЭС Украины — ЕЭС России определена из условий отстройки от ожидаемых колебаний обменной мощности и/или от вероятного отказа наиболее мощной цепи многоцепного транзита. Допустимое из этих условий среднее значение перетока в сечении CENTREL (ОЭС Восточной Европы) — ОЭС Украины достаточно для энергообеспечения таких стран, как Португалия, Греция или Австрия на Западе и Белоруссия или Казахстан на Востоке при погашении значительной части или даже всех действующих электростанций в любой из этих стран.

Ключевые слова: энергосистема, энергообъединение, слабая связь, параллельная работа, надежность, колебания мощности и частоты, автоматическое регулирование, вероятностный анализ

В последние годы в научно-технической периодике разных стран, на международных научных конференциях и в рабочих группах различных международных энергетических организаций обсуждаются разнообразные аспекты возможного создания межконтинентальных энергообъединений. Среди них одним из наиболее протяженных могло бы стать Евро-Азиатское объединение энергосистем (в дальнейшем ЕАОЭС), охватывающее объединения западно-европейских (UCPTE) и центрально-европейских (CENTREL)* энергосистем, Единую энергетическую систему (ЕЭС) России, а также параллельно работающие энергосистемы стран СНГ и еще нескольких сопредельных с ними стран. Мощности составных частей этого межконтинентального объединения (рис. 1) таковы, что пропускная способность имеющихся между ними линий переменного тока в ряде сечений транзита Восток—Запад имеет

* Страны, энергосистемы которых входят в UCPTE (с Запада на Восток): Португалия, Испания, Франция, Бельгия, Нидерланды, Люксембург, Швейцария, Германия, Италия, Австрия, Греция, республики бывшей Югославии.

В объединение CENTREL входят энергосистемы Польши, Чехии, Венгрии, Словакии, а также Восточной Германии (бывшей ГДР).

В состав ОЭС Восточной Европы наряду с энергосистемами нынешнего CENTREL входили энергосистемы Румынии и Болгарии.

The estimates of exchange power and frequency oscillations which are probable in a case of interconnection of power systems of European and CIS countries by AC lines with different kinds of their operation conditions automatic control are determined on a basis of a generalization of long statistical study results.

Transfer capability of the total combination of existing AC 220—380—750 kV transmission lines interconnecting UCPTE, CENTREL (IPS of Eastern Europe), IPS of the Ukraine and UPG of Russia, is defined with taking into account the expected exchange power oscillations and/or a failure of the greatest transfer capability circuit of the multi-circuit transit. The admissible mean value of power flow through CENTREL-IPS of the Ukraine interconnection, defined on the basis of these conditions is sufficient for power supply of such countries as Portugal, Greece or Austria in the West and Belorussia or Kazakhstan in the East if a considerable part or even all the existing power plants in any of these countries are in failure.

Key words: electrical power system, interconnection, weak tie-line, parallel operation, reliability, power and frequency oscillations, automatic control, probabilistical analysis, statistical evaluation

порядок 3—5% мощности меньшей из соединяемых частей ЕАОЭС. Электропередачи такой пропускной способности относят к категории «слабых связей». Одной из отличительных особенностей энергообъединений со слабыми связями является влияние на устойчивость их параллельной работы естественных колебаний небалансов мощности в соединяемых этими связями частях объединений. Эти колебания имеют случайный характер. В связи с этим в статье рассматриваются и решаются следующие задачи:

обобщается исторический опыт соединения мощных энергосистем (ЭС) и энергообъединений (ОЭС) посредством слабых связей;

воспроизводится апробированный практикой формирования и развития ЕЭС СССР метод оценивания численных показателей надежности параллельной работы энергосистем по слабой связи через вероятностные характеристики случайных колебаний небаланса мощности в меньшей из соединяемых ЭС (ОЭС);

на основе экстраполяции результатов широких статистических исследований, выполненных в прежние годы, и более современных статистических оценок колебаний частоты вычисляются прогнозные оценки ожидаемых колебаний мощ-

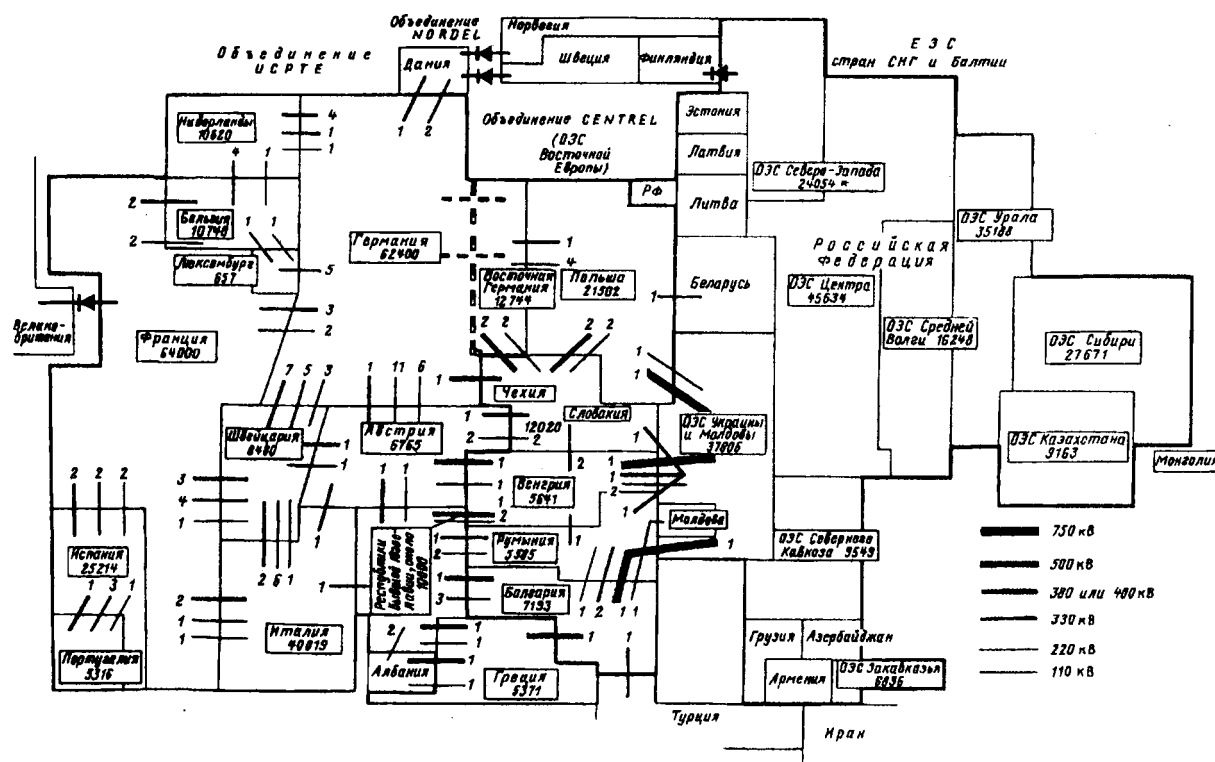


Рис. 1. Структура Евро-Азиатского объединения энергосистем. Число рядом с наименованием страны [в ЕЭС России — энергообъединений (ОЭС)] обозначает среднегодовую потребительскую нагрузку M_n в МВт по данным 1992 г. * — Потребление ОЭС Северо-Запада (24054 МВт) указано с учетом энергосистем Белоруссии и стран Балтии.

ности в основных сечениях транзита Восток—Запад в условиях разных вариантов организации регулирования частоты и мощности;

На основе изложенных теоретических представлений и экспериментальных результатов анализируется влияние эффекта соразмерности энергосистем на обеспечение не только возможности, но и эффективности использования слабых связей для их соединения;

полученные результаты используются для определения реальной пропускной способности имеющейся совокупности линий переменного тока 220—750 кВ транзит Восток—Запад с учетом необходимой отстройки: а) от случайных колебаний мощности и/или б) от внезапного отключения наиболее мощной из параллельных цепей многоцепного транзита (правило $n-1$);

попутно проводится предварительный анализ условий автоматического регулирования частоты до и после образования ЕАОЭС;

в заключение кратко затронут вопрос о взаимном дополнении электропередач переменного и постоянного тока при образовании мощных энергообъединений.

Статья обобщает и развивает основные положения доклада [1].

Из опыта соединения энергосистем посредством слабых связей. Практически ни одно из действующих в настоящее время крупных национальных или межгосударственных энергообъ-

единений на той или иной стадии своего формирования и развития не обошлось без более или менее продолжительного использования слабых связей. В скандинавском объединении NORDEL это была первая линия 220 кВ Финляндия—Швеция [2], в западно-европейском UCPTE — существующая и поныне линия 230 кВ Treves—Saint-Avold, посредством которой в 1956 г. соединились ОЭС Франции и Германии [3], в США — первые линии между Юго-Западным и Среднеконтинентальным объединениями и объединением Дальнего Запада и т.д. При формировании и развитии в свое время ЕЭС СССР целенаправленное использование слабых связей для реализации перечисляемых ниже преимуществ было одним из существенных аспектов технической политики, оправданность которой была доказана десятилетиями успешной работы Единой энергосистемы [4].

При возникновении коротких замыканий на слабых связях за время действия основных защит и АПВ фазовый угол между векторами напряжений по концам этих электропередач не успевает разойтись существенно, что облегчает условия сохранения синхронизма [5]. При внезапных разделениях соединяемых слабыми связями энергосистем частота в дефицитной части снижается относительно неглубоко и это, как правило, не вызывает действия АЧР. В то же время соединение энергосистем посредством слабых связей

позволяет, хотя и в ограниченной степени, реализовать общие преимущества объединения, в том числе:

несовпадение во времени максимумов нагрузки систем снижает общий максимум объединения (эффект совмещения), а следовательно, увеличивает общий резерв мощности и улучшает возможность аварийной и неаварийной взаимопомощи энергосистем;

вследствие увеличения общего уровня потребления в объединении снижается вариабельность частоты и облегчаются условия ее регулирования, а также освоения агрегатов большей единичной мощности на электростанциях, обычно более экономичных;

различия в структуре генерирующих мощностей и конфигурациях графиков потребительской нагрузки соединяемых систем обеспечивает возможность более экономично маневрировать мощностями электростанций при ведении режимов объединения и т.д.

Однако использование слабых связей было сопряжено и с некоторыми негативными аспектами. Обобщение опубликованных в [6—13] данных эксплуатации об основных причинах нарушений устойчивости параллельной работы энергосистем, соединявшихся слабыми связями в первые годы их использования в энергообъединениях (см. табл. 1), показывает, что на каждую обследованную слабую связь приходилось около трех (в среднем 3,2) нарушений устойчивости за год, причем почти два из них (63%) приходилось на долю превышений предела статической устойчивости электропередач возникающими в соединяемых системах небалансами мощности. К нарушениям устойчивости приводили либо так называемые «минутные» и еще более медленные нерегулярные колебания небалансов мощности, либо отклонения фактических нагрузок от прогнозировавшихся накануне суточных графиков последних. Случаи нарушения устойчивости более быстрыми, так называемыми «секундными» флуктуациями небалансов мощности не были зафиксированы практикой по причине их малости.

Таблица 1

Номер	Период наблюдения (месяцы)	Число нарушений устойчивости	Причины нарушений, %				
			КЗ и отключения генераторов	КЗ и отключения линий	внезапный дефицит (избыток) мощности	превышение предела	прочие причины
1	1—18	22	18	23	—	59	—
2	24—26	26	—	—	27	61	12
3	36—33	55	—	16	15	69	—
Среднее	26—28	3,2*	6	13	14	63	4

* Среднее число нарушений устойчивости на одну электропередачу за год.

Изложенный опыт показал необходимость систематического изучения случайных колебаний небалансов мощности в энергосистемах и выяснения влияния их вероятностных характеристик на устойчивость межсистемных электропередач.

Обобщаемое в табл. 1 распределение нарушений устойчивости слабых связей по причинам имело место при отсутствии на них автоматического регулирования перетоков мощности (АРПМ), которое стабилизирует среднее (за час, смену, сутки ...) значение перетока, равное «уставке» регулятора, и благодаря этому позволяет более эффективно использовать пропускную способность слабых связей. Однако стремление максимально использовать ее, назначая уставку АРПМ без учета вероятности отказа его элементов (в особенности каналов телеизмерения мощности электропередачи) или исчерпания регулировочного диапазона на электростанциях, на практике при возникновении этих событий приводило к почти немедленным превышениям предела слабой связи нерегулярными колебаниями мощности. Известны случаи, когда в этих условиях среднее время между последовательными перегрузками линии снижалось до 15 ч [12]. Это показало необходимость разработки вопросов рационального выбора регулировочного диапазона АРПМ и решения задачи назначения его уставки с учетом вероятного отказа элементов регулятора в условиях случайных колебаний небалансов в соединяемых системах.

Аналогичные проблемы пришлось решать на первых этапах соединения между собой национальных энергосистем Европы [2, 3 и др.], а также энергетических «пулов» в Америке. Следует отметить, что изложенный опыт в основном был приобретен на слабых связях, которыми соединялись существенно разные по мощности системы и объединения.

Не меньший практический интерес представляет анализ влияния отклонений частоты в объединениях на устойчивость параллельной работы соединяемых слабыми связями их составных частей. В этих целях в свое время в ЕЭС СССР были проведены значительные экспериментальные исследования. Так, в 1968 г., когда в составе южной части ЕЭС работали ОЭС Юга (Украины и Молдавии) и ОЭС Северного Кавказа, а в составе ее северной части — ОЭС Центра, Северо-Запада, Средней Волги и Урала, были проведены испытания параллельной работы Юг—Центр по линиям 330—220—110 кВ переменного тока общей пропускной способностью около 5,5% мощности южной части ЕЭС в одном направлении и примерно 3,5% — в противоположном. В этих условиях воздействием на мощность Волжских ГЭС (в северной большей части ЕЭС)

было осуществлено около 20 опытов изменения (возрастания) частоты в ту и другую стороны. Отклонения частоты до $\pm 0,3$ Гц ($\pm 0,6\%$) не приводили к нарушениям устойчивости слабой связи Юг—Центр. С учетом всей совокупности этих испытаний, в том же году была начата постоянная параллельная работа упомянутых южной и северной частей ЕЭС при названных выше значениях пропускной способности ($5,5\text{—}3,5\%$) соединявших их в то время межсистемных электропередач переменного тока.

Аналогичные опыты изменения частоты и с теми же результатами проводились и на последующих этапах развития ЕЭС СССР, в том числе при ее экспериментальных соединениях с ОЭС стран Восточной Европы: в 1971 г. по двум линиям 330 кВ общей пропускной способностью $1,7\%$ и в 1979 г. по линиям 750—330—220 кВ общей пропускной способностью $3,8\%$. С учетом результатов этих испытаний с 1979 г. была начата постоянная совместная работа ЕЭС СССР и ОЭС стран Восточной Европы, продолжавшаяся к взаимной выгоде сторон более 15 лет. За годы параллельной работы энергосистем от Берлина и Праги на Западе до Улан-Батора на Востоке (6 часовых поясов или примерно $1/4$ окружности Земли на соответствующих широтах) нарушения синхронизма вследствие превышений предела электропередачи случайными колебаниями мощности или ошибками прогнозирования нагрузки возникали в основном на периферийных слабых связях, соединявших с Объединением его относительно малые части. На связях между близкими по мощности частями Объединения нарушения устойчивости по этой причине если и происходили, то настолько редко, что никем не припоминаются. Систематизированный анализ лежащих в основе этого объективных факторов, по-видимому, впервые обобщается в настоящей статье.

Оценивание вероятностных характеристик надежности работы межсистемной электропередачи в условиях случайных колебаний мощности. Рассмотрим одноцепную линию электропередачи с пределом статической устойчивости $P_{пр}$, соединяющую две существенно разные по величине суммарной нагрузки энергосистемы (объединения): $P_1 \leq P_2 / (2,5\text{—}3)$. Под небалансом мощности меньшей ЭС (ОЭС) будем понимать следующую разность:

$$\xi(t) = P_r(t) - P_n(t), \quad (1)$$

где $P(t)$ — изменения во времени суммарной мощности; r — генераторов электростанций, n — потребительской нагрузки. Вероятностные характеристики случайных колебаний небаланса (1): дисперсию $D(t) = \sigma^2(t)$ и «среднеквадратическую

частоту» $n_0(t)$ — будем считать известными. Текущее время t отражает реально имеющую место нестационарность случайного процесса колебаний нагрузки и как следствие — небаланса мощности (1) и его вероятностных характеристик. Математическое ожидание перетока по линии обозначим $MP(t)$, а отстройку его предела устойчивости электропередачи $P_{пр}$ нормируем среднеквадратическим значением небаланса:

$$Z(t) = [P_{пр} - MP(t)] / \sigma(t). \quad (2)$$

Вследствие инерционности рассматриваемой электромеханической системы вероятность превышений колебаниями небаланса относительно уровня (2) больше вероятности нарушений устойчивости электропередачи этими выбросами. И напротив, среднее время T_0 между выбросами небаланса мощности короче среднего времени между обусловленными ими нарушениями устойчивости электропередачи. Отсюда понятно, что вероятностные характеристики выбросов небаланса мощности (1), а в случае соединения соизмеримых по мощности ЭС (ОЭС) — обменной мощности:

$$\xi_{12}(t) = \xi_1(t) - \xi_2(t) \quad (3)$$

сверх относительного уровня (2) могут использоваться как оценки вероятностных характеристик «надежности режима» электропередачи в условиях случайных колебаний мощности [10, 11]. При этом нарушения устойчивости рассматриваются как отказы в нормальном режиме электропередачи, поскольку поломки линии как физического объекта при этом обычно не происходит.

Формула для вычисления среднего времени между выбросами нормально распределенного стационарного случайного процесса была опубликована американским математиком Райсом и носит его имя [14]:

$$T_0 = \exp(z^2/2) \Phi(z) / n_0. \quad (4)$$

Здесь $\Phi(z)$ — интеграл нормального распределения вероятности, а «среднеквадратическая частота» случайного процесса равна

$$n_0 = [D_v(t)/D(t)]^{1/2} / 2\pi, \quad (5)$$

где D_v — дисперсия производной случайного процесса.

При $z = 2,5\text{—}3,0$ $\Phi(z) \approx 1$, и вероятность того, что за произвольно выбранный промежуток времени $S \ll T_0$ опасный для устойчивости электропередачи выброс не произойдет ни разу, может быть оценена так:

$$p_0(S) \approx \exp(-S/T_0) \approx 1 - S/T_0. \quad (6)$$

Ниже на основе результатов систематического изучения колебаний небалансов мощности в энергосистемах и с учетом данных табл. 1 будет показано, что для межсистемных связей без АРПМ достаточная из практических соображений надежность режима электропередачи обеспечивается отстройкой среднего значения $MP_{\text{п}}$ перетока от предела $P_{\text{пр}}$ на величину $4,5 \div 5,0 \sigma_{\xi}$ — при условии ручной коррекции перетока оперативным персоналом не реже одного раза в час [12].

При наличии АРПМ вероятность его отказа или исчерпания регулировочного диапазона требует предоставления оперативному персоналу времени, достаточного для уяснения возникающей ситуации и осуществления соответствующих мер по ручной коррекции перетока. Для этого «уставку» АРПМ достаточно отстроить от предела $P_{\text{пр}}$ на $2,5 \div 3,0 \sigma_{\xi}$ [15].

Обобщение этих рекомендаций на многоцепную межсистемную связь предложено ниже.

Методы и основные результаты статистического оценивания вероятностных характеристик колебаний небалансов мощности. Для возможности использования формул (4), (6) и т.п. в практике управления режимами межсистемных электропередач необходимо располагать статистическими оценками вероятностных характеристик реальных колебаний небалансов мощности и возможностью обобщения этих оценок на ЭС, ОЭС, ЕЭС с разным уровнем математического ожидания (МО) потребительской нагрузки $M_{\text{н}}$ и на отрезках времени разной длительности $s < S < \Sigma$.

Реально вероятностные характеристики «минутных» и более медленных колебаний небалансов мощности могут быть оценены статистически тремя методами [16]:

1) по колебаниям частоты ЭС (ОЭС) при ее изолированной работе (и в отсутствие автоматического регулирования частоты и мощности (АРЧМ));

$$\sigma_{\xi}(t) \approx K_c \sigma_{\varphi}(t), \quad n_{0\xi}(t) \approx n_{0\varphi}(t), \quad (7)$$

где K_c — коэффициент крутизны статической частотной характеристики ЭС, который определяется специальными экспериментами [17];

2) по колебаниям мощности линии электропередачи, соединяющей ЭС (ОЭС) с существенно более мощной системой (объединением):

$$\sigma_{\xi}(t) \approx \sigma_{\rho}(t), \quad n_{0\xi}(t) \approx n_{0\rho}(t); \quad (8)$$

3) комбинацией этих методов в объединении трех и более соизмеримых по мощности ЭС (ОЭС) [18].

В этих методах подразумевается отсутствие в исследуемой ЭС (ОЭС) вторичного автома-

тического регулирования частоты (АРЧМ); 2-й метод реализуется и при соединении линией близких по уровню потребления ЭС (ОЭС), но при условии, что общая частота такого объединения поддерживается АРЧМ, работающим в одной из соединяемых частей.

Суточная, недельная и сезонная нестационарность случайного процесса колебаний нагрузки по МО, дисперсии и показателю автокорреляционной функции [19] приводит к тому, что по существу единственным способом получения не связанных с текущим временем статистических оценок колебаний небалансов, частоты и обменной мощности является применение так называемого двухкратного осреднения: а) оценивания текущих оценок D_i, n_{0i} по реализациям фиксированной длительности $s < S < \Sigma$ и б) осреднения полученного «ансамбля» из N оценок с применением доверительных интервалов.

При этом характеристика n_0 может оцениваться двумя способами: либо вычислениями по формуле (5) с оцениванием дисперсии скорости D_v путем численного дифференцирования реализаций, либо непосредственным подсчетом числа пересечений случайным процессом уровня, равного оценке его МО, делением на длительность реализации и осреднением полученных результатов по «ансамблю» из N оценок, и то же с вычислением ширины доверительного интервала. В связи с суточной цикличностью режимов электропотребления для длительностей $S=1$ ч достаточно иметь «ансамбль» из $N=24$, в крайнем случае — из 12 реализаций.

Изложенное оценивание статистик колебаний частоты и межсистемных перетоков являлось непременной составной частью программ всех натурных испытаний, которые предшествовали присоединению местных ЭС к региональным ОЭС и последовательному объединению девяти ОЭС в Единую энергосистему (ЕЭС) СССР, а затем при ее соединении с ОЭС шести стран Восточной Европы [16].

На рис. 2 обобщаются оценки σ и n_0 колебаний мощности в зависимости от уровня $M_{\text{н}}$ при фиксированной длительности реализаций $S=1$ ч, а на рис. 3 и 4 — при фиксированных уровнях $M_{\text{н}}$ в зависимости от длительностей реализаций S .

Характер зависимости $\sigma(S)$ от уровня $M_{\text{н}}$ определяется диапазоном изменения последнего в разных ЭС (ОЭС, ЕЭС). В ОЭС с уровнем $M_{\text{н}} \leq 40-45$ ГВт оценки $\sigma(S)$ возрастают в соответствии с кривой 1 рис. 2, МВт:

$$\sigma(S=1\text{ч}) \leq 0,5 (M_{\text{н}})^{1/2}. \quad (9)$$

При увеличении $M_{\text{н}}$ до 200 ГВт (и, вероятно, более) характер возрастания этих оценок несколь-

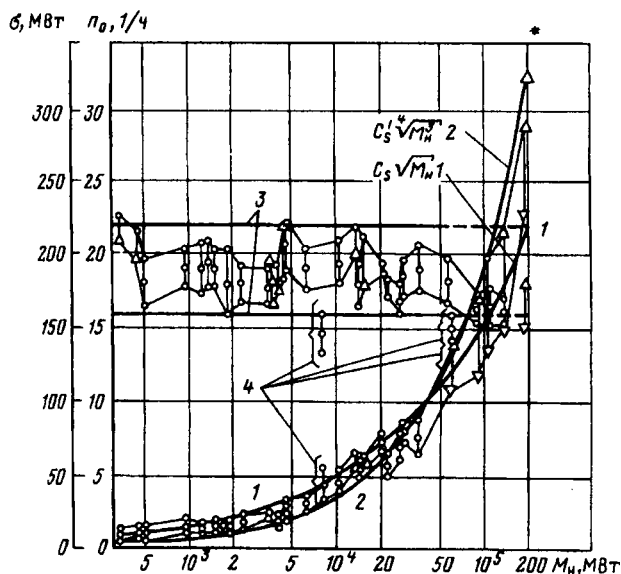


Рис. 2. Обобщенные зависимости статистических характеристик колебаний мощности энергосистем ОЭС и ЕЭС, полученных двукратным осреднением реализаций продолжительностью $S=1$ ч, от средней (за время регистрации) нагрузки систем M_n : ОО — по колебаниям перетока; $\Delta\Delta\Delta$ — по колебаниям частоты; VVV — то же, но с отделением нестационарного математического ожидания путем фильтрации; 1 — согласно зависимости (9); 2 — согласно зависимости (9а); 3 — согласно выражению (11а); оценки 4 получены вблизи зимнего максимума нагрузки соответствующих энергосистем; для каждого значения M_n показаны либо осредненные оценки, полученные разными методами, либо осредненные и «доверительные» оценки, полученные соответствующим методом

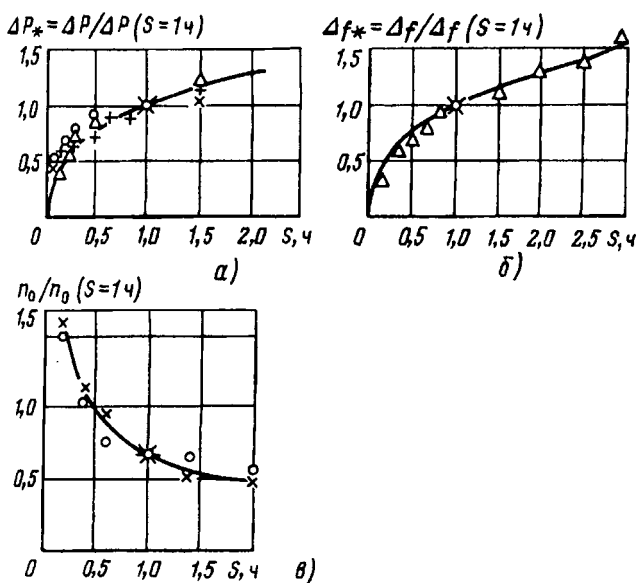


Рис. 3. Зависимости от продолжительности реализаций: размаха колебаний межсистемных перетоков (а), частоты энергосистем и ОЭС (б) и показателя n_0 перетоков (в); +++ — $M_n=14800$ МВт; ОО — $M_n=29300$ МВт; $\times\times\times$ — $M_n=35200$ МВт; $\Delta\Delta\Delta$ — $M_n=33400$ МВт; аппроксимирующие кривые приведены в соответствии с выражениями (10а) и (11)

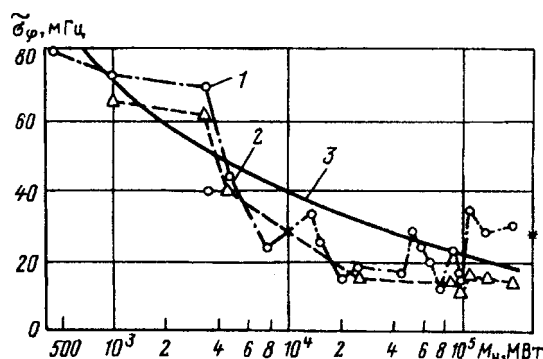


Рис. 4. Средние квадратические значения колебаний частоты σ_f энергосистем ОЭС и ЕЭС в зависимости от средней нагрузки системы M_n : 1 — для отклонений от среднечасового уровня; 2 — для фильтрованных данных (СибНИИЭ) при интервалах $S=1$ ч; 3 — аппроксимирующая кривая

ко изменяется (кривая 2 на рис. 2), МВт:

$$\sigma(S=1 \text{ ч}) \leq 0,035 (M_n)^{3/4}. \quad (9a)$$

Это связано с тем, что в очень больших объединениях мощности одиночных электроприемников отстают от уровня M_n по-видимому, примерно так: $P_a \sim M^{1/2}$.

При фиксированном M_n характер зависимостей $\sigma(M_n)$ от длительностей реализаций определяется диапазоном изменения длительностей $s < S$ и $s \ll S$ (рис. 3), МВт:

$$\sigma(S)/\sigma(s) \approx (S/s)^{1/2}; \quad (10)$$

$$\sigma(\Sigma)/\sigma(s) \approx (\Sigma/s)^{1/4}. \quad (10a)$$

Аналогичен характер зависимостей от длительности реализаций осредненных оценок полного размаха колебаний перетоков и частоты на этих реализациях (рис. 4, а и б).

В противоположность возрастающим зависимостям (10) и (10а), оценки показателя n_0 интенсивности случайных колебаний мощности в ЭС с фиксированным уровнем M_n при увеличении длительностей реализаций $S > s$ убывают (рис. 4, в), 1/ч:

$$n_0(s)/n_0(S) \approx (s/S)^{1/2}. \quad (11)$$

Но при фиксированной длительности реализаций оценки n_0 практически не зависят от уровня M_n в ЭС (ОЭС, ЕЭС), 1/ч:

$$n_0(M_n, S=1 \text{ ч}) \approx n_0(S=1 \text{ ч}). \quad (11a)$$

Для $S=1$ ч численные значения экспериментальных оценок этого показателя составляли от 16 до 22 1/ч (ограничивающие линии 3 на рис. 2).

Поскольку пропускную способность межсистемных электропередач принято выражать в про-

центах мощности меньшей из соединяемых ЭС (ОЭС, ЕЭС), то интересно рассмотреть характер зависимости от уровня M_H вариации колебаний небалансов мощности, %:

$$\sigma^* = \sigma 100/M_H. \quad (12)$$

Подставив сюда (9) и (9а), получаем: для $M_H \leq 40-45$ ГВт, %:

$$\sigma^* (S = 1 \text{ ч}) \leq 50/M_H^{1/2}, \quad (13)$$

а для M_H до 200 ГВт (и, вероятно, более), %

$$\sigma^* (S = 1 \text{ ч}) \leq 3,5/M_H^{1/4}. \quad (13a)$$

Обобщенными здесь результатами многолетних статистических исследований [13, 16] многократно подтверждено вытекающее из теоретико-вероятностных представлений нормальное распределение вероятности колебаний нагрузки и небалансов мощности. Как известно, параметрами нормального распределения являются МО и дисперсия σ^2 , причем последняя полностью определяет распределение вероятностей отклонений небаланса от его МО. Для практики имеет значение, что для реализаций длительностью $S=1$ ч оценки размаха распределения вероятности колебаний небалансов мощности в разных ЭС (ОЭС) составляют $4 \div 5\sigma$ [16].

Одинаковость величин (11а) в разнообразных ЭС и ОЭС означает, что характеристики (4), (6) надежности параллельной работы в основном определяются значением отстройки (2) среднего перетока от предела электропередачи, т.е. среднеквадратическим отклонением небаланса мощности σ .

Не менее интересное практическое значение экспериментального результата (11а) состоит в том, что в ЭС и ОЭС самой разной мощности для измерения и регистрации изменений нагрузки, частоты, межсистемных перетоков могут использоваться приборы и телеизмерение с одинаковой разрешающей способностью. Верно и обратное: приборы и телеизмерения с одинаковой разрешающей способностью в ЭС самой разной мощности обеспечивают одинаковую информативность измерения и регистрации изменений нагрузки, частоты и перетоков.

Отражающие объективные особенности рассматриваемого случайного процесса зависимости (10), (10а) объясняют упоминавшуюся ранее малость быстрых («секундных») колебаний мощности, которые уже по этой причине не представляют опасности для устойчивости даже относительно очень слабых связей; к тому же эта часть спектра флуктуаций небаланса в ЭС в значительной степени подавляется инерционностью последних как электромеханических систем. Иное

дело «минутные» и более медленные колебания. Для ЭС (ОЭС) с уровнем потребления $M_H = 5-7$ тыс. МВт размах «минутных» колебаний мощности, наблюдаемых на реализациях длительностью $S \geq 1$ ч, согласно (13) достигает 3,0–3,2%, а это соизмеримо с пропускной способностью слабых связей $\leq 10\%$. Поэтому не удивительно, что колебания небалансов мощности (наряду с отклонениями графиков нагрузки от прогнозировавшихся) оказались преобладающей (60–65%) причиной нарушений устойчивости слабых связей (см. табл. 1).

Но для объединения с уровнем потребления $M_H \approx 100$ ГВт размах колебаний мощности на реализациях $S=1$ ч согласно (13а) составляет уже только 0,8–1,0%; поэтому для межсистемных связей с пределом $P_{пр} \approx 10\%$ при нормативных запасах устойчивости случайные колебания мощности создают уже значительно меньший риск нарушений синхронизма.

Обобщение статистического изучения колебаний частоты. Рассмотренные экспериментальные статистические результаты согласуются с представлениями вероятностной теории колебаний электрической нагрузки [19], и на основе ее выводов могут быть использованы для оценивания колебаний мощности основных электропередач Восток–Запад по значениям уровней M_H в соединяемых ими частях ЕАОЭС. Но в связи с прогнозным характером этих оценок их желательно проверить и другим способом, а именно — через статистические характеристики колебаний частоты. В этих целях в табл. 2 и на рис. 4 обобщаются полученные ранее результаты оценивания σ_f частоты как функции уровня потребления M_H за время регистрации. Как можно было ожидать, в широком диапазоне значений M_H общая тенденция изменения σ_f согласуется с зависимостью (13а), Гц:

$$\sigma_f (S = 1 \text{ ч}) = c/M_H^{1/4}. \quad (14)$$

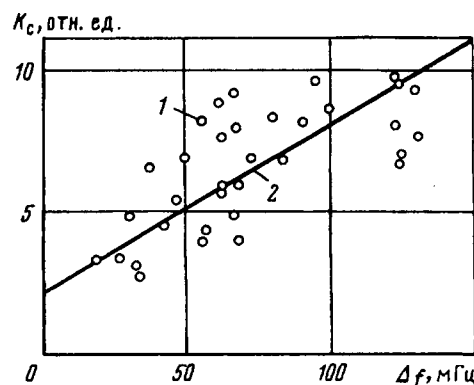


Рис. 5. Коэффициент крутизны статической частотной характеристики энергосистем и объединений в области малых отклонений частоты и мощности обобщено по данным [13, 16, 17]: 1 — опытные точки; 2 — линия регрессии

Таблица 2

Число часовых интервалов	Средняя нагрузка M_n , МВт	σ_f , мГц	Место (объект) и время проведения испытаний
3	450	80/—	Одессэнерго и Молдглавэнерго, август 1965 г.
21	965	72,5/65,0	Омскэнерго, октябрь, 1974 г.
13	3300	69,7/61,0	ОЭС Казахстана (без части энергосистем) октябрь 1974 г.
15	3500	40/—	Иркутскэнерго, август 1967 г.
1	4540	43,8/40	ОЭС Казахстана и Омскэнерго, октябрь 1974 г.
3	5700	24,0/—	ОЭС Сибири (без Иркутскэнерго), сентябрь 1966 г.
2	13500	33,5/—	ОЭС Юга и Северного Кавказа, июнь 1967 г.
4	15600	25,5/—	То же, июль 1968 г.
13	20250	15,5/—	ОЭС Сибири, октябрь 1974 г.
86	25000	18,5/16,0	ОЭС Сибири, декабрь 1975 г.
6*	45170	17,4/—	ЕЭС европейской части СССР, июнь 1968 г.
10	50600	28,0/—	ЕЭС европейской части СССР, июнь 1971 г. (ночь)
10	63200	20/—	То же, день
20	57000	24,4/—	То же, среднее значение
10	73550	13,0/—	ЕЭС европейской части СССР и ОЭС СЭВ, июнь, 1971 г., ночь
10	96450	15,0/—	То же, день
20	85000	14,0/—	То же, среднее значение
14	89800	23,2/14,0	ЕЭС СССР и ОЭС Сибири, октябрь 1974 г.
10	95230	16,4/11,5	ЕЭС СССР, октябрь 1974 г.
86	105000	34,5/15,8	ЕЭС СССР, декабрь 1975 г.
10	138200	28,0/—	ЕЭС СССР (с ОЭС Сибири), январь 1979 г.
15	193500	30,0/13,8	ЕЭС СССР (с ОЭС Сибири) и ОЭС СЭВ, январь 1979 г.

Примечания: 1. Значения σ_f : в числителях — данные без фильтрации (методика ВНИИЭ), в знаменателях — после отделения нестационарного математического ожидания путем фильтрации (методика СибНИИЭ).

Результаты, получены для интервалов $\tau=6$ мин и пересчитаны для $S=60$ мин с помощью зависимости (10а).

При фиксированных уровнях M_n зависимость оценок σ_f частоты от длительности реализаций в довольно широком диапазоне изменения последней согласуется с выражениями (10) и (10а) (рис. 3,б).

На рис. 5 показана регрессионная зависимость оценок коэффициента K_c крутизны статической частотной характеристики различных ЭС, ОЭС, а также ЕЭС СССР в целом (и в том числе при ее параллельной работе с энергосистемами стран Восточной Европы) от отклонений частоты в опытах. Зависимость получена путем обобщения экспериментальных оценок из [16]; она имеет место в связи с общей нелинейностью и, в частности, с зоной нечувствительности механических регуляторов скорости турбин.

Анализ воспроизводимости результатов статистического изучения колебаний частоты и мощности. Представленные ранее статистические результаты обобщают данные разных источников, в том числе [16] 1985 г., причем в нижней строке табл. 2 можно видеть, что они относятся к еще более раннему периоду не позднее января

1979 г., когда в испытаниях параллельной работы ЕЭС СССР с ОЭС Восточной Европы были получены следующие оценки «сигмы» частоты и среднего за время регистрации последней значения суммарной нагрузки:

$$\sigma_f (S=1 \text{ ч}) = 30,0 \text{ мГц}; M_n = 193500 \text{ МВт} \quad (15)$$

Необходимо проанализировать воспроизводимость опубликованных ранее экспериментальных статистических зависимостей на более свежем исходном материале. Для возможности сопоставления с результатом (15) за январь 1979 г. в табл. 3 приведены результаты осреднения за январь 1993 г. ежесуточных оценок дисперсии частоты параллельно работавших ОЭС стран Восточной Европы и ЕЭС СССР, а также энергообъединения стран УСРТЕ.

Таблица 3

Объединение, время регистрации частоты	Среднемесечные оценки: дисперсии/среднеквадратического отклонения частоты (мГц ² /мГц) за сутки	
	без АРЧМ	с АРЧМ
ЕЭС СССР+ОЭС Восточной Европы, январь 1993 г.	4252/65,2	800/28,3
УСРТЕ, октябрь 1993 г.	940/30,6	532/23,1

Осреднение за этот месяц потребительской нагрузки и оценок «сигмы» частоты (с приведением последней к совпадающей длительности реализаций $S=1$ ч с помощью зависимости (10а) дает следующие результаты:

$$\sigma_f (S=1 \text{ ч}) = 29,2 \text{ мГц}; M_n = 235400 \text{ МВт}. \quad (15а)$$

Если ранее опубликованная зависимость (14) остается в силе, то полученные при разном уровне потребления оценки M_n и σ_f должны находиться в следующем соотношении:

$$\sigma_f / \sigma_{f2} = M_2 / M_1^{1/4}. \quad (16)$$

Подстановка результатов (15) и (15а) дает следующие численные значения левой и правой частей этого соотношения: 1,027 и 1,050. Они различаются менее чем на 3%. Это дает возможность приобщить новый результат (15а) к ранее полученным многолетним данным (звездочка в правой части рис. 4).

Вновь полученная оценка σ_f частоты параллельно работающих ЕЭС и ОЭС может быть использована для вычисления с помощью выражения (7) σ_ξ небаланса мощности. Но для этого необходимо располагать результатом экспериментального определения коэффициента K_c при отклонении частоты в опыте $\Delta f \geq \sigma_f$ (1 ч) (для того чтобы она была достаточно заметна на фоне естественных флуктуаций частоты) [17].

В свое время при испытании параллельной работы ЕЭС СССР и ОЭС стран Восточной Ев-

ропы были получены следующие экспериментальные оценки: $K_c = 8,0$ при $\Delta f = 81,3$ мГц (черта сверху означает результат осреднения). Значение K_c , отвечающее значению отклонения частоты $\Delta f \geq \sigma_\varphi$ (1 ч) = 29,2 мГц, получается пропорциональным пересчетом с помощью линейной регрессии рис. 5: $K_c \approx 2,9$.

Подстановка этого значения и результатов (15а) и (7) дает: σ_ξ (1 ч) = 428 МВт. Между тем, с помощью зависимости (9а) получается несколько более оптимистическая оценка 358 МВт, которая на рис. 2 приобщена к более ранним результатам (звездочка в верхней правой части рис. 2).

Испытания по определению возможности и условий параллельной работы ЕАОЭС по существующим связям переменного тока должны существенно дополнить и обновить имеющиеся результаты статистического изучения колебаний межсистемных (межгосударственных) перетоков мощности, а также колебаний частоты непосредственными экспериментальными оценками.

Влияние соразмерности соединяемых систем на колебания обменной мощности между ними. При соединении линией электропередачи ЭС (ОЭС) с существенно различающимися уровнями потребления $M_1 \ll M_2$ колебания небаланса мощности меньшей ЭС не могут оказывать сколько-нибудь заметного влияния на общую частоту такого объединения и потому почти полностью воспроизводятся в колебаниях мощности межсистемной связи (см. выше выражения (8)). При $M_1 \approx M_2$ и отсутствии АРЧМ в объединении положение иное: на возникающий в одной из его частей небаланс такое объединение реагирует отклонением не только межсистемного перетока, но и общей частоты. Отклонения от своих математических ожиданий небалансов ξ_1 , ξ_2 в соединяемых ЭС (ОЭС), перетока мощности ρ между ними и частоты φ объединения связаны известной системой уравнений:

$$\begin{aligned}\xi_1(t) - K_1 \varphi(t) &= \rho(t); \\ \xi_2(t) - K_2 \varphi(t) &= -\rho(t).\end{aligned}\quad (17)$$

Отсюда получается выражение для дисперсии колебаний перетока, которая в отличие от (8) равна:

$$\sigma_\rho^2 = [\sigma_1^2 K_2^2 + \sigma_2^2 K_1^2 - 2r\sigma_1\sigma_2 K_1 K_2] / (K_1 + K_2)^2, \quad (18)$$

где r — коэффициент взаимной корреляции, являющийся показателем взаимной линейной вероятностной связи случайных величин, в данном случае — колебаний небалансов: если при увеличении ξ_1 в среднем увеличивается и ξ_2 , то $r > 0$, а если ξ_2 уменьшается, то $r < 0$; если связь между ними закономерная, то $r = +1$ или -1 , а если она отсутствует вовсе, то $r = 0$. На ре-

ализациях $S = 1$ ч оценки коэффициента корреляции небалансов соседних ЭС не достигают статистически значимого уровня и потому могут приниматься $r(S = 1 \text{ ч}) \approx 0$. Тогда при соединении совершенно одинаковых ($K_1 = K_2$, $\sigma_1 = \sigma_2$, $r \approx 0$) ЭС (ОЭС) выражение (18) упрощается:

$$\sigma_\rho \approx \sigma_\xi / \sqrt{2}. \quad (18a)$$

Это наглядно показывает, что при соединении близких по мощности ЭС (ОЭС) колебания межсистемных перетоков оказываются меньше колебаний небаланса в любой из соединяемых систем. Положительная коррелированность небалансов соединяемых ЭС (ОЭС) только усиливает этот эффект.

В этом состоит одна из физических причин отмеченного ранее факта: нарушения устойчивости межсистемных слабых связей, соединяющих близкие по уровню потребления $M_1 \approx M_2$ ЭС (ОЭС), практически крайне редко вызываются нерегулярными колебаниями обменной мощности. В итоге, можно сделать следующий общий вывод: убывание согласно (13) и (13а) относительных флуктуаций небалансов по мере увеличения уровней потребления M_n в ЭС (ОЭС) и эффект соизмеримости соединяемых частей объединений являются важными физическими предпосылками не только возможности, но и эффективности соединения мощных ЭС (ОЭС) посредством слабых связей при всей ограниченности пропускной способности последних.

Отстройка режима многоцепной слабой связи от основных вероятностных возмущений. Обобщаемые ранее экспериментальные статистические результаты позволяют выбрать такое значение МО межсистемного перетока, которым обеспечивалась бы приемлемая надежность (6) параллельной работы соединяемых линий ЭС (ОЭС) в условиях случайных колебаний небалансов в них. Вопрос заключается в том, какую надежность можно считать приемлемой.

Согласно табл. 1 в среднем примерно 1,2 нарушений устойчивости одной слабой связи за год приходилось на долю коротких замыканий с отключением нагруженных линий (с неуспешным АПВ) (или генераторов). Вероятность отказов, к примеру, ВЛ 500 кВ длиной 100—300 км имеет порядок 10^{-4} — 10^{-3} [20]. Такие возмущения оперативный персонал энергосистем эффективно предотвратить не может. Если при этих возмущениях происходит перегрузка слабой связи, то нарушение устойчивости параллельной работы соединяемых ею энергосистем неизбежно. Отличие такого возмущающего фактора, как естественные колебания небалансов и обменной мощности, состоит в том, что снижением среднего перетока по линии вероятность превышения

предела устойчивости выбросом небаланса (обменной мощности) принципиально можно свести до любого наперед заданного минимального значения. Представляется, что не следует требовать, чтобы эта вероятность была меньше 10^{-4} — 10^{-3} . Допустимое из этих соображений среднее значение межсистемного перетока мощности должно быть [10, 11]:

$$MP_{\Pi} \leq P_{\text{пр}} - (4,5 \div 5,0) \sigma_{\xi} (S=1 \text{ ч}). \quad (20)$$

Но эта рекомендация относится к одноцепному транзиту. В основных сечениях предполагаемого ЕАОЭС: УЧНТЕ — CENTREL (ОЭС Восточной Европы) — ОЭС Украины и Молдавии — ЕЭС России транзит переменного тока — многоцепный (см. рис. 1). Если отстройка 5σ в (20) меньше предаварийного перетока по наиболее мощной цепи транзита, то причиной нарушения синхронизма окажется факт внезапного отключения этой цепи. Если же суммарный переток отстроен от вероятности отказа самой мощной цепи, а ее пропускная способность меньше 5σ колебаний мощности, то при отказе этой цепи суммарный предел оставшихся цепей может быть превышен случайными колебаниями мощности. Поэтому для очень ответственных многоцепных слабых связей рекомендацию (20) целесообразно обобщить так:

$$MP_{\Pi} = P_{\text{пр}} - [(4,5-5) \sigma + P_{\text{ц}}], \quad (20)$$

где $P_{\text{ц}}$ — пропускная способность наиболее мощной цепи многоцепного транзита.

Необходимая для подстановки в (20), (20а) величина σ обменной мощности зависит от соотношения уровней потребления $M_{\text{н}}$ в соединяемых частях Объединения или/и от условий регулирования в нем частоты и мощности.

При соединении ЭС (ОЭС) с существенно разными уровнями $M_1 \leq M_2$ или с близкими уровнями $M_1 \approx M_2$, но таких, что автоматическое регулирование общей частоты Объединения осуществляется электростанциями, расположенными только по одну сторону межсистемного транзита, значение σ меньшей и/или не регулирующей частоту ЭС (ОЭС) может быть оценено по уровню потребления $M_{\text{н}}$ с помощью экспериментальных результатов, обобщенных ранее.

При соединении ЭС (ОЭС) с близкими значениями $M_1 \approx M_2$ значение σ для подстановки в (20), (20а) вычисляется с помощью выражения (18), с использованием тех же данных. В пределах при $M_1 = M_2$ колебания мощности транзита снижаются примерно на 40%, и за счет этого может быть увеличен допустимый переток. Существенно отметить, что работа АРЧМ с обеих сторон межсистемного транзита не изменяет упомянутого эффекта. Это обусловлено инерционностью вторичного регулирования, которое способно подав-

лять колебания небалансов с периодами $\tau \geq 10$ —15 мин [21], в то время как колебания мощности, результаты изучения которых обобщаются выше — более «быстрые», их средние периоды равны: $\tau_0 = 60/(n_0 = 22-16) \approx 3$ —4 мин.

Отстройку перетока от опасных выбросов обменной мощности обозначим через «а», а от внезапного отказа наиболее мощной цепи транзита — «б». В гипотетических условиях, когда общая частота Объединения регулируется электростанциями только Западной или только Восточной части ЕАОЭС, в основных сечениях транзита Восток—Запад значение «а», как правило, превышает возмущение «б». Если же АРЧМ работает с обеих сторон транзита, то в силу $M_1 \approx M_2$ колебания обменной мощности уменьшаются (в пределах до 40%) и начинает превалировать возмущение «б».

При учете с помощью (20а) одновременно «а» и «б» риск нарушения параллельной работы имеет порядок не более 10^{-6} , но максимальная надежность режима дается ценой снижения допустимого перетока Восток—Запад. Если же с помощью (20а) учитывать «а» ИЛИ «б», то допустимый переток увеличивается на значение не учтенного возмущения, но с одновременным увеличением риска нарушения параллельной работы до 10^{-4} — 10^{-3} . Последнее можно интерпретировать как вероятность нарушения не более чем на одном часовом интервале из 1000—10000, т.е. за периоды от 1,5 до 14 месяцев. Практика ЕЭС СССР показала, что для этого оперативному персоналу достаточно контролировать и при необходимости корректировать переток в среднем 1 раз в час, на периодах утреннего подъема и вечернего спада нагрузки — чаще. Эффект АРПМ состоит в стабилизации среднего (за час, смену, сутки, ...) значения перетока. При этом уставка АРПМ может назначаться так:

$$MP_{\text{АРПМ}} \leq P_{\text{пр}} - (2,5-3,0) \sigma_{\xi} (S=1 \text{ ч}). \quad (20б)$$

Это получается из условия, чтобы при внезапном отказе АРПМ диспетчерский персонал имел 10—15 мин для того, чтобы уяснить ситуацию и успеть принять зависящие меры по снижению перетока до уровня (20) [15].

Об условиях автоматического регулирования частоты и мощности в ЕАОЭС. В связи с большим значением, которое придается в УЧНТЕ качеству поддержания частоты, представляется желательным провести сравнительный анализ условий ее автоматического регулирования до и после соединения линиями переменного тока Западной и Восточной частей Объединения. Из вышеизложенного ясно, что необходимые для этого статистические оценки колебаний частоты должны быть получены на реализациях одина-

ковой длительности за сопоставимое время и с контролем среднего за время регистрации частоты уровня M_n потребления.

Решение поставленной задачи осложняется двумя обстоятельствами:

АРЧМ в UCPTE построено децентрализованно и не может быть отключен. Поэтому σ_φ естественных нерегулируемых колебаний частоты UCPTE придется оценивать косвенно (рис. 5);

ЕЭС России, ОЭС Украины и энергосистемы стран Восточной Европы в последнее время длительно не работали параллельно, в связи с чем по Восточной части ЕАОЭС придется воспользоваться оценками за период, когда энергосистемы упомянутых стран еще работали параллельно, т.е. за 1993 г.

Результаты осреднения за месяц суточных оценок дисперсии частоты были представлены в табл. 3. Для возможности сопоставлений с обобщенными ранее результатами данные табл. 3 целесообразно привести к длительности реализаций $S=1$ ч, для чего воспользуемся зависимостью (10а). Полученные с учетом этих замечаний часовые оценки сведены в табл. 4.

Таблица 4

Номер	Объединение	Уровень потребления M_n , МВт	Оценки среднеквадратического отклонения частоты для реализации $S=1$ ч, мГц	
			без АРЧМ	с АРЧМ
1*	UCPTE	240000	30,6	10,0
2**	ЕЭС+ОЭС	260000	30,0	12,5
3	ЕАОЭС	500000	22–21	8–7

* Имеется в виду UCPTE без энергосистем CENTREL.

** Имеются в виду энергосистемы стран СНГ и Балтии, работавшие в составе ЕЭС СССР, а также энергосистемы Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии и Чехословакии, работавшие в составе ОЭС стран — членов бывшего СЭВ.

Данные табл. 4 позволяют видеть, что при всех известных недочетах организации и техники АРЧМ в параллельно работавших ЕЭС СССР и ОЭС стран-членов СЭВ обеспечивавшееся им качество поддержания среднечасовых значений частоты ($\sigma=12,5$ мГц) не намного уступало таковому в UCPTE (10 мГц).

Анализ данных табл. 4 показывает, что естественные (т.е. без АРЧМ) колебания частоты в предполагаемом ЕАОЭС должны примерно на 40% уменьшиться по сравнению с их значениями, имеющими место в обеих частях Объединения до замыкания транзита Восток—Запад. Таким образом, условия автоматического поддержания частоты на уровне стандартов UCPTE при замыкании транзита Восток—Запад заметно облегчаются. Вполне вероятно, что при этом может оказаться достаточно регулировочного диапазона АРЧМ, имеющегося на электростанциях UCPTE. Но при такой «односторонней» организации

АРЧМ стабилизация общей частоты ЕАОЭС будет сопряжена с дестабилизацией мощности основного транзита переменного тока Восток—Запад, на который в полном объеме лягут колебания небалансов Восточной части Объединения. При паритетной же организации АРЧМ и близком качестве регулирования частоты как в Западной, так и Восточной частях Объединения колебания мощности транзита Восток—Запад будут уменьшены в 1,4–1,3 раза. Как следствие, это позволит увеличить размеры взаимобмена мощностью и энергией между Востоком и Западном.

Об условиях работы Объединения при экспериментальном замыкании транзита Восток—Запад. Обобщенные выше теоретические представления и экспериментальные результаты позволяют определить размеры взаимобмена мощностью в ЕАОЭС, допустимые из условий надежной отстройки от наиболее вероятных возмущений при разных вариантах организации автоматического регулирования режима Объединения. В этих целях наибольший интерес представляют следующие сечения транзита Восток—Запад: UCPTE—CENTREL (и ОЭС Восточной Европы в целом) — ОЭС Украины и Молдавии — ЕЭС России в следующих вариантах организации вторичного регулирования частоты и мощности: АРЧМ работает 1) с одной и 2) с обеих сторон от каждой из перечисленных электропередач или 3) работает АРПМ электропередачи. Расчеты допустимых для этих условий среднечасовых перетоков мощности выполнены с помощью формул (20), (20а), (20б). Результаты обобщаются в табл. 5. При этом для сечений UCPTE—CENTREL (ОЭС Восточной Европы) в качестве $P_{пр}$ использованы суммы термических пределов имеющихся линий 220–380 кВ, а для сечений CENTREL (Восточная Европа) — Украина — Россия — статистические пределы электропередач.

Из данных табл. 5 можно видеть, что пределы передаваемых мощностей в рассматриваемых сечениях транзита переменного тока Восток—Запад составляют от 2,4 до 4,7% уровня среднегодового потребления M_n в соединяемых частях ЕАОЭС. Но при этом в наиболее «узком» месте UCPTE—CENTREL определяемое из условия (20б) среднечасовое значение перетока мощности составляет 3–3,5 тыс. МВт, которое увеличивается до 6,55–7,15 тыс. МВт, т.е. почти удваивается, если дополнительно замкнуть линии 220–380 кВ, имеющиеся между Болгарией, Румынией и странами UCPTE—CENTREL. Для сравнения: среднегодовое потребление таких стран, как Португалия, Греция и Австрия в UCPTE, Словакия и Венгрия в CENTREL, Болгария и Румыния в ОЭС Восточной Европы не превышают 6–7 тыс. МВт. Таким образом, замыкание уже существующих, но

Таблица 5

Но- мер	Электро- передача	Уровень потребления, ГВт		Число линий переменно- го тока	Предел передачи		Вариант регулиру- вания ²	Возмущение, МВт		MP _п , МВт
		Запада	Востока		МВт	%M ₁		σ (1 ч)	P _ц	
1	UCPTE ¹ — CENTREL	250	262	6 × 380 кВ 5 × 220 кВ	6000	2,4	1 2,а 2,б 3	400 285 285 400	1050 1050 1050 —	2950 3500 4550 4800
2	UCPTE— ОЭС Восточной Европы ¹	250	275	9 × 380 10 × 220	9700	3,9	1 2,а 2,б 3	420 300 300 420	1050 1050 1050 —	6550 7150 8200 8440
3	CENTREL— ОЭС Украины и Молдавии	302	210	2 × 750 2 × 400 2 × 220	7000	3,3	1 2,а 2,б 3	340 260 260 340	1300 1300 1300 —	4000 4400 5700 6000
4	ОЭС Восточной Европы— ОЭС Украины и Молдавии	315	210	4 × 750 4 × 400 4 × 220	10000	4,7	1 2,а 2,б 3	340 260 260 340	1300 1300 1300 —	7000 7400 8700 9000
5	ОЭС Украины— ЕЭС России	353	172	1 × 750 1 × 500 5 × 330 2 × 220	4500	2,6	1 2,а 2,б 3	295 210 210 295	1300 1300 1300 —	1700 2150 3200 3600

Примечания: 1) Принятый здесь состав энергосистем UCPTE, CENTREL и ОЭС Восточной Европы — см. в подстрочном примечании на стр. 2.

2) Варианты вторичного регулирования: 1 — АРЧМ работает с одной стороны транзита; 2 — АРЧМ работает по обе стороны транзита, но для 2а — учтены возмущения «а» и «б», а для 2б — учтено большее из возмущений «а» или «б»; 3 — работает АРПМ.

пока лишь ограниченно используемых линий переменного тока позволило бы резервировать потерю почти 100% генерирующей мощности электростанций любой из названных стран.

Результаты табл. 5 имеют интегральное значение для составных частей будущего ЕАОЭС, расположенных к востоку от границ UCPTE. А между тем, для национальных энергосистем стран Центральной и Восточной Европы, находящихся между двумя гигантами — UCPTE и ЕЭС России (+стран СНГ), представляют интерес оценки σ мощности электропередач переменного тока, проходящих непосредственно по их территории. Но эти оценки могут быть получены только экспериментальным путем, при опытном замыкании всех составных частей транзита переменного тока Восток—Запад. Кроме того, данные табл. 5 получены на основе экстраполяции данных ЕЭС СССР, обобщенных на рис. 3 за несколько десятков предшествующих лет. Испытания параллельной работы Восток—Запад позволят получить реальные оценки колебаний мощности и частоты для еще более обоснованного решения вопросов организации и техники управления и автоматического регулирования режимов межконтинентального Объединения энергосистем.

О взаимном дополнении электропередач переменного и постоянного тока. В бывшей ЕЭС СССР между ОЭС Украины и ОЭС Центра имелось несколько линий 500—110 кВ переменного тока, а также передача постоянного тока (ППТ) ± 400 кВ. Проведенные в свое время испытания показали, что скачкообразное изменение мощности ППТ на ΔP приводит к изменению на то же

значение, но в противоположную сторону суммарного перетока по цепям переменного тока. Источник колебаний небаланса мощности меньшей из соединяемых ОЭС—Украины — рассредоточен по всей ее территории, в то время как скачок мощности ППТ локализован на ней самой. Интересно, что распределение этого скачка между цепями переменного тока довольно хорошо совпадало с распределением между ними среднеквадратичной величины колебаний суммарного перетока Юг—Центр. Это показывает, что колебания небаланса мощности даже таких крупных образований, как ОЭС Украины с уровнем потребления $M_n \approx 35000$ МВт, при решении некоторых практических задач можно считать как бы локализованными, сосредоточенными в какой-то эквивалентной точке электрической схемы ОЭС.

Второй вывод состоит в том, что соответствующее управление передачей постоянного тока может почти полностью снять случайные колебания мощности с межсистемных цепей переменного тока, а следовательно, существенно ослабить проблему влияния случайных колебаний мощности на устойчивость параллельной работы энергообъединений.

Результаты экспериментального замыкания существующих передач переменного и постоянного тока транзита Восток—Запад будут весьма полезны для проектирования системы управления энергомота постоянного тока Франкфурт—Берлин—Варшава—Минск—Смоленск, технико-экономическое обоснование которой разрабатывается специалистами России, Германии и других частных к этому проекту стран.

Выводы. 1. Соединение крупных энергообъединений слабыми связями переменного тока требует учета колебаний мощности для обеспечения надежности параллельной работы.

2. Убывание относительных колебаний мощности с ростом уровня электропотребления и эффект соизмеримости систем и объединений являются существенными предпосылками не только возможности их соединения посредством слабых связей, но и эффективности использования последних.

3. Пропуская способность уже существующих между объединениями UCRTE, CENTREL, ОЭС Украины и ЕЭС России линий переменного тока, определенная с учетом отстройки от случайных колебаний мощности и/или от вероятности отказа любой, в том числе наиболее мощной, цепи транзита Восток—Запад, вполне достаточна для обеспечения высокой надежности работы при опытном замыкании Евро-Азиатского Объединения энергосистем (ЕАОЭС).

4. Полученные в работе оценки вероятностных характеристик колебаний мощности и частоты, а также значений транзитных перетоков при образовании ЕАОЭС имеют ориентировочный характер и нуждаются в экспериментальном уточнении, в том числе желательно изучение реальных закономерностей распределения МО и σ суммарного перетока по сетям разных стран, находящихся на транзите Восток—Запад.

5. Значительная часть диапазона случайных колебаний мощности передач переменного тока может быть снята путем соответствующего автоматического регулирования параллельных передач постоянного тока. Но это требует дополнительной проработки вопроса, с учетом результатов экспериментальной параллельной работы ЕАОЭС по связям переменного и постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Exchange power oscillations under parallel operation of intercontinental power system interconnections / A.F. Bondarenko, L.A. Koscheev, A.M. Mashansky, A.A. Okin, M.G. Portnoj, V.F. Timchenko (Russia), A.G. Batalov (Ukraine). — CIGRE, 1994, report 37—102.
2. Wedeen A., Voipio E., Johansson K.E. Controlling the interconnected power systems of Sweden and Finland. — CIGRE, 1960, report N 311.
3. Cahen F. et Dejon A. Le control automatique de la marche en parallele de tres vastes ensembles d'interconnexion. — Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens, Aout 1958.
4. Совалов С.А. Режимы Единой энергосистемы. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Портной М.Г. Ресинхронизация энергосистем, соединяемых «слабыми связями». — Труды ВНИИЭ, вып. XV. — М.: Госэнергоиздат, 1963.
6. Портной М.Г., Руденко Ю.Н., Ясников В.Н. Объединение энергосистем Сибири слабыми межсистемными связями. — Электрические станции, 1963, № 5.
7. Ясников В.Н., Руденко Ю.Н. Современное состояние и перспективы покрытия графиков нагрузки Объединенной энергосистемы Сибири. — В кн.: Методы покрытия пиков электрической нагрузки. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.
8. Портной М.Г. Устойчивость межсистемных электропередач и автоматическое регулирование перетоков мощно-

сти. — В кн.: Автоматическое регулирование перетоков по межсистемным связям. — М.: Энергия, 1965.

9. Кучкин М.Д., Совалов С.А. Основные режимные требования к автоматическому регулированию перетоков мощности и принципы регулирования. — В кн.: Автоматическое регулирование перетоков по межсистемным связям. — М.: Энергия, 1965.

10. Портной М.Г., Тимченко В.Ф. Учет нерегулярных колебаний мощности при определении устойчивости слабых связей в энергосистемах. — Электричество, 1968, № 9.

11. Андриук В.А., Марченко В.М. Надежность работы слабых межсистемных связей. — Доклады на II Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. — М.: Энергия, 1969.

12. Тимченко В.Ф. Случайные колебания нагрузки энергосистем и надежность энергоснабжения по слабым связям. — Доклады на II Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. — М.: Энергия, 1969.

13. Тимченко В.Ф. Колебания нагрузки и обменной мощности энергосистем. — М.: Энергия, 1975.

14. Rice S.O. Mathematical analysis of random noise. — Bell Telefon System Journal, 1944, v. 23, № 3; 1945, v. 24, № 1.

15. Об учете вероятностных факторов при управлении режимом межсистемных электропередач / В.А. Веников, М.Г. Портной, Е.В. Путятин, В.Ф. Тимченко — Электричество, 1972, № 2.

16. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович и др. Под ред. С.А. Совалова. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

17. Вонсович М.Я., Левит Л.М., Совалов С.А. Определение действующего коэффициента крутизны частотной характеристики энергосистем. — Электрические станции, 1989, № 7.

18. Виттек В. Статистический метод измерения крутизны частотных характеристик энергосистем и дисперсий их нагрузок. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1965, № 1.

19. Дьяков А.Ф., Сюткин Б.Д., Тимченко В.Ф. Вероятностная теория, статистический анализ и интервальное прогнозирование режимов электропотребления электроэнергетических систем. — Изв. РАН. Энергетика, 1992, № 5.

20. Гайснер А.Д., Тимченко В.Ф. Учет основных факторов повреждаемости при статистическом анализе надежности дальних линий электропередачи и применение его результатов. — Электричество, 1974.

21. Алексеев С.В., Копылов И.Б., Машанский А.М. Описание энергообъединения как объекта управления режимом по частоте и мощности. — Электричество, 1980, № 12.

[10.01.97]

Авторы: Окин Анатолий Андреевич окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Всесоюзного заочного политехнического института в 1967 г. В 1976 г. защитил кандидатскую диссертацию «Определение управляющих воздействий противоаварийной автоматики для повышения устойчивости энергосистем» в Научно-исследовательском институте электроэнергетики (ВНИИЭ). С 1988 г. главный инженер Центрального диспетчерского управления Единой энергосистемы (ЦДУ ЕЭС) России.

Портной Марлен Гдалиевич окончил ЭЭФ Московского энергетического института (МЭИ) в 1952 г. В 1960 г. защитил кандидатскую диссертацию «Ресинхронизация в энергосистемах после несинхронного АВП». Главный специалист ЦДУ ЕЭС России.

Тимченко Владимир Федорович окончил ЭЭФ МЭИ в 1959 г. В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование случайных колебаний нагрузки и обменной мощности энергосистем для управления режимами межсистемных электропередач» в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского. Ведущий научный сотрудник ВНИИЭ.

Проблемы формирования межгосударственного энергообъединения Восточной Азии

БЕЛЯЕВ Л.С., ВОРОПАЙ Н.И., ПОДКОВАЛЬНИКОВ С.В., ШУТОВ Г.В.

Проведен обобщенный анализ современного состояния и перспектив формирования межгосударственного энергообъединения Восточной Азии. Отмечены особенности стран и территорий этого региона с точки зрения интеграции и кооперации их хозяйственной деятельности. Сделана оценка масштабов и основных направлений межсистемных и межгосударственных потоков электроэнергии на перспективу и показана эффективность некоторых из них. Приведены примеры возможных межгосударственных электрических связей. Указаны некоторые направления и проблемы создания межгосударственного энергообъединения в рассматриваемом регионе.

Ключевые слова: объединение электроэнергетических систем, межгосударственные электрические связи, энергетические и экономические эффекты, линии постоянного тока, нагрузка, перспектива

Объединение электроэнергетических систем (ЭЭС) государств и отдельных территорий приобретает в мировой практике все большие масштабы. В настоящее время сформированы межгосударственные энергообъединения Западной Европы и Северной Америки, прорабатываются технические вопросы объединения ЭЭС Западной и Восточной Европы. Исследуются возможности создания межгосударственных энергообъединений в Африке, Южной Америке, на Ближнем Востоке. На удаленную перспективу рассматриваются возможные варианты формирования Единой энергосистемы мира [1—3 и др.].

Одним из наиболее перспективных с точки зрения возможностей создания межгосударственного энергообъединения является Восточно-Азиатский регион, включающий Восточную Сибирь (ВСР) и Дальний Восток (ДВР) России, Китай, Японию, Монголию, Южную Корею и КНДР [4—7 и др.].

Особенности региона. Характерной особенностью стран и территорий Восточной Азии является то, что их хозяйственные комплексы, находясь в географической близости, имея разный уровень и темпы экономического развития, обладая разными запасами энергетических ресурсов, являются взаимодополняемыми и вследствие этого могут выгодно взаимодействовать друг с другом [8].

Так, Восточная Сибирь и Дальний Восток России являются по сути дела развивающимися территориями как в энергетическом, так и в

The generalized analysis of the present state and prospects of formation of interstate power pool of Eastern Asia has been carried out. Specific features of countries and territories of this region are pointed out from the point of view of integration and cooperation of their economic activity. An estimation is made of main directions of intersystem and interstate perspective power flows the efficiency of certain of them is shown. Examples of potential interstate electric connection are given. Certain directions and problems of creating interstate power pool in the region considered are pointed out.

Key words: power pool, interstate electric ties, energy and economic effects, DC transmission lines, load, perspective

экономическом плане. Существующая кризисная ситуация в экономике России не позволяет с достаточной определенностью прогнозировать темпы и масштабы их развития. Данные территории недостаточно обеспечены рабочей силой и капиталом, но обладают огромными запасами природных, в том числе топливно-энергетических ресурсов, которые могут быть вовлечены в топливно-энергетические балансы стран Восточной Азии.

Китай в настоящее время стремительно развивает свою экономику, и перспективные планы развития не предусматривают снижения темпов экономического роста. Экономически наиболее развитые провинции в основном находятся в Юго-Восточном Китае. Однако основные запасы энергоресурсов находятся в Северном (уголь) и Западном (гидроресурсы, нефть) Китае [9], на значительном расстоянии от мест их основного потребления. Трудовые ресурсы Китая значительны и, по-видимому, могут быть использованы для реализации энергетических проектов в трудододефицитных странах региона.

Интенсивно развивает свою экономику Южная Корея. Ее долгосрочные программы развития предусматривают значительный рост потребности в электроэнергии. В то же время Южная Корея сравнительно бедна топливными ресурсами и определяющим образом зависит от импорта газа, нефти и нефтепродуктов.

Япония имеет высокоразвитую стабильную экономику, но обладает сравнительно небольшо-

Таблица 1

Основные показатели электроэнергетики
Восточно-Азиатского региона в 1995 г.

Страна, территория	Выработка электроэнергии, ГВт·ч	Установленная мощность электростанций, ГВт			
		Всего	ГЭС	ТЭС	АЭС
Восточная Россия:	159,60	41	20,5	20,5	
в том числе					
Красноярский край	67,9	17,7	10,2	7,5	
Иркутская область	59,4	13,1	9	4,1	—
Бурятия	3,3	1,3	—	1,3	—
Читинская область	4,3	1,2	—	1,2	—
Амурская область	7,1	1,8	1,3	0,5	—
Южная Якутия	2,2	0,6	—	0,6	—
Хабаровский край	8,0	2,0	—	2	—
Приморский край	9,7	2,7	—	2,7	—
Сахалин	2,5	0,6	—	0,6	—
Китай:	1006,9	217,2	53,0	162,1	2,1
в том числе					
Северо-Восточный	130,9	27,2	4,4	22,8	—
Северный	153,2	29,9	1,2	28,7	—
Восточный	180,7	37,0	2,4	34,6	—
Центральный	145,8	30,4	11,4	18,7	0,3
Северо-Западный	63,1	12,6	5,0	7,6	—
Юго-Западный	51,8	10,7	4,3	—	6,4
Южный	164,8	42,1	16,0	24,3	1,8
Остальные районы	116,6	27,3	8,3	19	—
Монголия*	2,9	0,9	—	0,9	—
КНДР	23	7,2	4,3	2,3	—
Южная Корея	182	32,2	3,1	20,5	8,6
Япония*	964	221	40,6	140	40,4

* Данные 1994 г.

установленной генерирующей мощности и выработке электроэнергии для отдельных территорий Восточной Азии [8—14]. Основные электрические сети региона показаны на рис. 1.

Восточная Сибирь (прежде всего Красноярская

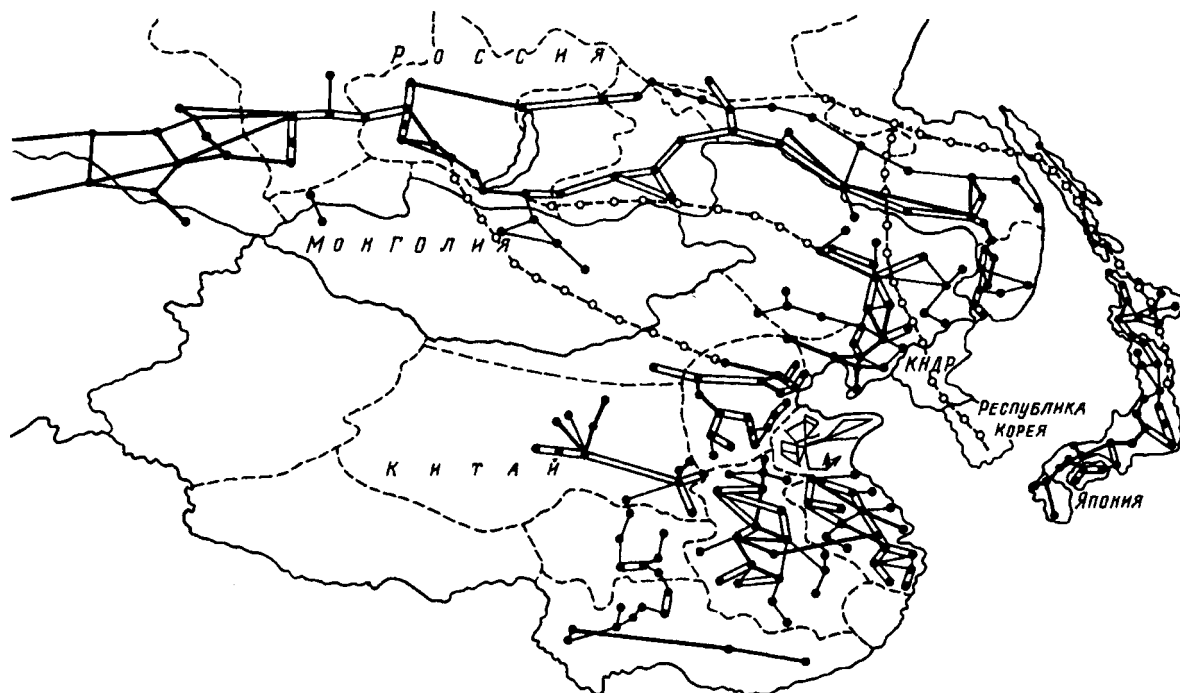


Рис. 1. Схемы основных электрических сетей Восточной Азии: ——— — линии 330–500 кВ; ——— — 220 кВ; — — — — перспективные МГС

и Иркутская ЭЭС) является избыточной по мощности и электроэнергии, так как развитие ее электроэнергетики было направлено не только на покрытие собственных потребностей, но и в значительной мере на выдачу электроэнергии на Урал и в европейскую часть страны. Однако кризис в экономическом развитии России привел к снижению электропотребления. Потребность в электроэнергии в ранее дефицитных регионах в основном покрывается за счет собственных энергоисточников, и передача электроэнергии из ВСР на запад резко уменьшилась. Таким образом, избытки мощности и энергии ЭЭС ВСР стали не востребованными. Учитывая, что здесь имеются благоприятные условия для дополнительного привлечения топливно-энергетических ресурсов в электроэнергетику — гидроресурсы Ангаро-Енисейского бассейна (Богучанская ГЭС), угли Канско-Ачинского месторождения (Березовские ГРЭС), газ — эта территория на достаточно продолжительный период может рассматриваться как надежный экспортер электроэнергии. По оценке авторов экспортный потенциал Восточной Сибири оценивается в размере до 40 ТВт·ч на уровне 2010 г.

На Дальнем Востоке предусматривается развитие местных топливных баз, имеются возможности дальнейшего гидроэнергостроительства, обсуждаются вопросы сооружения атомных электростанций (АЭС). Кроме того, здесь имеются уникальные возможности использования приливной энергии и прорабатываются проекты приливных электростанций (ПЭС) — в первую очередь Тугурской (около 7 ГВт), а в последующем более экзотической Пенжинской (до 90 ГВт в максимальном варианте). Из гидроресурсов следует иметь в виду запасы гидроэнергии на юге Саха-Якутии (Южно-Якутский гидроэнергетический комплекс). Таким образом, на Дальнем Востоке в перспективе может быть создан избыток электроэнергии, который можно эффективно использовать в других регионах Восточной Азии.

Китай развивает свою электроэнергетику в соответствии с требованиями, обусловленными экономическим ростом народного хозяйства. Ежегодный прирост установленной генерирующей мощности и выработки электроэнергии за последние 10 лет составлял 9—10%. Установленная мощность электростанций с 80 ГВт в 1984 г. увеличилась к 1994 г. в 2,5 раза и составила 200 ГВт. В 2010 г. планируется получить установленную мощность более 500 ГВт с выработкой порядка 2500 ТВт·ч электроэнергии [9]. Выработка электроэнергии и ее распределение между потребителями обеспечивается сейчас пятнадцатью провинциальными и региональными

(охватывающими несколько провинций) ЭЭС, основу которых составляют линии 110 и 220 кВ.

С ростом электропотребления и увеличением перетоков мощности внутри провинциальных систем и между ними начали вводить линии 500 кВ, с помощью которых планируется объединить отдельные ЭЭС и к 2000 г. создать единую электроэнергетическую систему страны. Однако удаленность месторождений энергоресурсов и недостаток энергетических мощностей при высоком уровне электропотребления уже в настоящее время обуславливают дефицит электроэнергии на Юго-Востоке Китая. В перспективе ожидается дефицит и в ряде других провинций, в частности на Северо-Востоке страны.

В Южной Корее за последние пять лет электропотребление увеличивалось в среднем почти на 12% ежегодно. Долгосрочной программой развития на 10 лет (1995—2006 гг.) предусматривается ежегодное увеличение потребности в электроэнергии на 8%, что заставляет в условиях недостатка внутренних источников энергоресурсов развивать ядерную энергетику. В отличие от Китая и России энергосистема Южной Кореи работает на частоте 60 Гц.

Япония занимает третье место в мире по установленной мощности электростанций и производству электроэнергии. Имея сравнительно небольшие относительные приросты мощности (2+3% в год), в абсолютном исчислении электроэнергетика Японии существенно увеличивает установленную мощность своих электростанций. При дефиците собственных энергоресурсов наиболее перспективным источником электроэнергии рассматривается ядерная энергетика. Электроэнергетические системы двенадцати крупных и множества мелких энергокомпаний, обеспечивающих питание потребителей, объединены в основном с помощью ЛЭП 500 кВ в единую систему страны, имеющую две рабочие частоты (50 Гц в северо-восточной части страны и 60 Гц в юго-западной). Граница между ними проходит приблизительно посередине о. Хонсю, а объединение их на совместную работу осуществляется с помощью двух вставок постоянного тока с суммарной пропускной способностью 900 МВт.

В период 1975—1985 гг. электропотребление КНДР росло высокими темпами, увеличиваясь более чем на 6% ежегодно. Однако в последующие десятилетия эти темпы замедлились почти в 3 раза. Потребность в электроэнергии КНДР покрывает за счет собственных источников. В настоящее время несколько более половины выработки электроэнергии приходится на ГЭС, остальное — на тепловые электростанции (ТЭС). Рассматривается предложение по сооружению одного-двух ядерно-энергетических реакторов юж-

Таблица 1

Основные показатели электроэнергетики
Восточно-Азиатского региона в 1995 г.

Страна, территория	Выра- ботка электро- энергии, ТВт·ч	Установленная мощность электростанций, ГВт			
		Всего	ГЭС	ТЭС	АЭС
Восточная Россия:	159,60	41	20,5	20,5	
в том числе					
Красноярский край	67,9	17,7	10,2	7,5	
Иркутская область	59,4	13,1	9	4,1	—
Бурятия	3,3	1,3	—	1,3	—
Читинская область	4,3	1,2	—	1,2	—
Амурская область	7,1	1,8	1,3	0,5	—
Южная Якутия	2,2	0,6	—	0,6	—
Хабаровский край	8,0	2,0	—	2	—
Приморский край	9,7	2,7	—	2,7	—
Сахалин	2,5	0,6	—	0,6	—
Китай:	1006,9	217,2	53,0	162,1	2,1
в том числе					
Северо-Восточный	130,9	27,2	4,4	22,8	—
Северный	153,2	29,9	1,2	28,7	—
Восточный	180,7	37,0	2,4	34,6	—
Центральный	145,8	30,4	11,4	18,7	0,3
Северо-Западный	63,1	12,6	5,0	7,6	—
Юго-Западный	51,8	10,7	4,3	—	6,4
Южный	164,8	42,1	16,0	24,3	1,8
Остальные районы	116,6	27,3	8,3	19	—
Монголия*	2,9	0,9	—	0,9	—
КНДР	23	7,2	4,3	2,3	—
Южная Корея	182	32,2	3,1	20,5	8,6
Япония*	964	221	40,6	140	40,4

* Данные 1994 г.

ми запасами собственных энергоресурсов и практически полностью ориентируется на импорт сжиженного газа, нефти и нефтепродуктов.

В Южной Корее и Японии сосредоточен большой технологический и технический потенциал, а также значительный капитал, который может быть эффективно инвестирован, например, в развивающуюся энергетику ВСР и ДВР. КНДР располагает значительными природными, в том числе топливно-энергетическими, ресурсами (в основном углем и гидроэнергоресурсами). Ведутся работы по поиску нефти. КНДР располагает также рабочей силой, однако, капитала и современной техники имеет недостаточно.

В экономическом отношении Монголия, пожалуй, наименее развита по сравнению с другими странами региона. Однако она имеет достаточные запасы угля и гидроэнергоресурсов. Имеются также залежи урановой руды. Ведутся работы по поиску нефти. КНДР располагает также рабочей силой, однако, капитала и современной техники имеет недостаточно.

В экономическом отношении Монголия, пожалуй, наименее развита по сравнению с другими странами региона. Однако она имеет достаточные запасы угля и гидроэнергоресурсов. Имеются также залежи урановой руды. Ведутся геологоразведочные работы для поиска нефти. Квалифицированной рабочей силой, капиталом и современной техникой в настоящее время Монголия располагает недостаточно.

Современное состояние электроэнергетики стран региона. В таблице приведены данные по

установленной генерирующей мощности и выработке электроэнергии для отдельных территорий Восточной Азии [8—14]. Основные электрические сети региона показаны на рис. 1.

Восточная Сибирь (прежде всего Красноярская

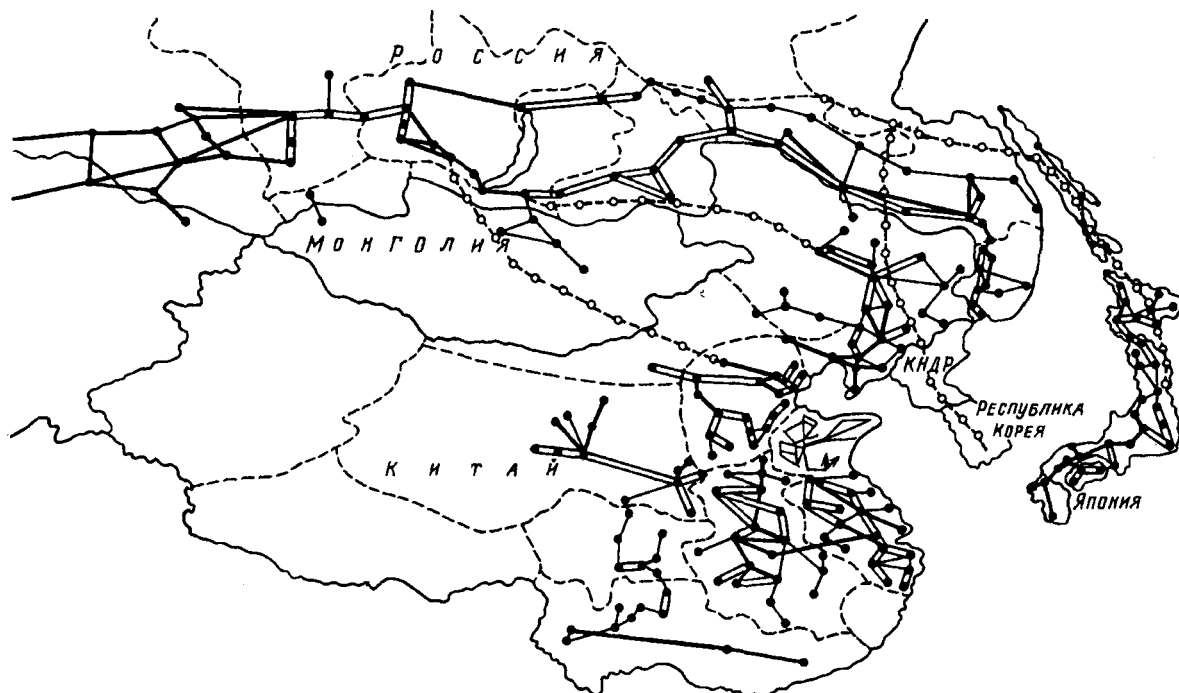


Рис. 1. Схемы основных электрических сетей Восточной Азии: ——— — линии 330–500 кВ; ——— — 220 кВ; — · — — перспективные МГС

и Иркутская ЭЭС) является избыточной по мощности и электроэнергии, так как развитие ее электроэнергетики было направлено не только на покрытие собственных потребностей, но и в значительной мере на выдачу электроэнергии на Урал и в европейскую часть страны. Однако кризис в экономическом развитии России привел к снижению электропотребления. Потребность в электроэнергии в ранее дефицитных регионах в основном покрывается за счет собственных энергоисточников, и передача электроэнергии из ВСР на запад резко уменьшилась. Таким образом, избытки мощности и энергии ЭЭС ВСР стали невостребованными. Учитывая, что здесь имеются благоприятные условия для дополнительного привлечения топливно-энергетических ресурсов в электроэнергетику — гидроресурсы Ангара-Енисейского бассейна (Богучанская ГЭС), угли Канско-Ачинского месторождения (Березовские ГРЭС), газ — эта территория на достаточно продолжительный период может рассматриваться как надежный экспортер электроэнергии. По оценке авторов экспортный потенциал Восточной Сибири оценивается в размере до 40 ТВт·ч на уровне 2010 г.

На Дальнем Востоке предусматривается развитие местных топливных баз, имеются возможности дальнейшего гидроэнергостроительства, обсуждаются вопросы сооружения атомных электростанций (АЭС). Кроме того, здесь имеются уникальные возможности использования приливной энергии и прорабатываются проекты приливных электростанций (ПЭС) — в первую очередь Тугурской (около 7 ГВт), а в последующем более экзотической Пенжинской (до 90 ГВт в максимальном варианте). Из гидроресурсов следует иметь в виду запасы гидроэнергии на юге Саха-Якутии (Южно-Якутский гидроэнергетический комплекс). Таким образом, на Дальнем Востоке в перспективе может быть создан избыток электроэнергии, который можно эффективно использовать в других регионах Восточной Азии.

Китай развивает свою электроэнергетику в соответствии с требованиями, обусловленными экономическим ростом народного хозяйства. Ежегодный прирост установленной генерирующей мощности и выработки электроэнергии за последние 10 лет составлял 9—10%. Установленная мощность электростанций с 80 ГВт в 1984 г. увеличилась к 1994 г. в 2,5 раза и составила 200 ГВт. В 2010 г. планируется получить установленную мощность более 500 ГВт с выработкой порядка 2500 ТВт·ч электроэнергии [9]. Выработка электроэнергии и ее распределение между потребителями обеспечивается сейчас пятнадцатью провинциальными и региональными

(охватывающими несколько провинций) ЭЭС, основу которых составляют линии 110 и 220 кВ.

С ростом электропотребления и увеличением перетоков мощности внутри провинциальных систем и между ними начали вводить линии 500 кВ, с помощью которых планируется объединить отдельные ЭЭС и к 2000 г. создать единую электроэнергетическую систему страны. Однако удаленность месторождений энергоресурсов и недостаток энергетических мощностей при высоком уровне электропотребления уже в настоящее время обуславливают дефицит электроэнергии на Юго-Востоке Китая. В перспективе ожидается дефицит и в ряде других провинций, в частности на Северо-Востоке страны.

В Южной Корее за последние пять лет электропотребление увеличивалось в среднем почти на 12% ежегодно. Долгосрочной программой развития на 10 лет (1995—2006 гг.) предусматривается ежегодное увеличение потребности в электроэнергии на 8%, что заставляет в условиях недостатка внутренних источников энергоресурсов развивать ядерную энергетику. В отличие от Китая и России энергосистема Южной Кореи работает на частоте 60 Гц.

Япония занимает третье место в мире по установленной мощности электростанций и производству электроэнергии. Имея сравнительно небольшие относительные приросты мощности (2÷3% в год), в абсолютном исчислении электроэнергетика Японии существенно увеличивает установленную мощность своих электростанций. При дефиците собственных энергоресурсов наиболее перспективным источником электроэнергии рассматривается ядерная энергетика. Электроэнергетические системы двенадцати крупных и множества мелких энергокомпаний, обеспечивающих питание потребителей, объединены в основном с помощью ЛЭП 500 кВ в единую систему страны, имеющую две рабочие частоты (50 Гц в северо-восточной части страны и 60 Гц в юго-западной). Граница между ними проходит приблизительно посередине о. Хонсю, а объединение их на совместную работу осуществляется с помощью двух вставок постоянного тока с суммарной пропускной способностью 900 МВт.

В период 1975—1985 гг. электропотребление КНДР росло высокими темпами, увеличиваясь более чем на 6% ежегодно. Однако в последующие десятилетия эти темпы замедлились почти в 3 раза. Потребность в электроэнергии КНДР покрывает за счет собственных источников. В настоящее время несколько более половины выработки электроэнергии приходится на ГЭС, остальное — на тепловые электростанции (ТЭС). Рассматривается предложение по сооружению одного-двух ядерно-энергетических реакторов юж-

нокорейского производства. Электроэнергетическая система КНДР работает на частоте 60 Гц.

В Монголии ЭЭС охватывает только центральные и частично западные районы страны. В настоящее время электропотребление в стране находится на уровне 1985 г. Базой электроэнергетики Монголии являются тепловые электростанции. Гидростанций пока нет, однако есть предложение по их сооружению для решения проблемы покрытия переменной части графика нагрузки. Небольшие объемы электроэнергии (0,4 ТВт·ч в 1995 г.) Монголия импортирует из России.

Потенциальные направления и объемы перетоков электроэнергии в регионе. Суммарный объем перетоков электроэнергии из энергоизбыточных стран и территорий региона в энергодефицитные на перспективу до 2010 г. оценивается в 115 ТВт·ч/год, в том числе экспорт из России может составить 65 ТВт·ч/год [6]. Преимущественные направления этих перетоков: с севера на юг (из России в сопредельные страны региона) и с запада на восток (из внутренних провинций Китая в прибрежные). Оценочные объемы и направления перетоков электроэнергии внутри Восточно-Азиатского региона приведены на рис. 2. Они получены путем обобщенного анализа перспектив и особенностей развития экономики и энергетики стран и отдельных территорий с учетом размещения и возможностей использования источников электроэнергии. Кроме того, реализация межсистемных эффектов с учетом различной конфигурации годовых и суточных графиков нагрузки, взаимопомощи резервами и т.п. обусловит значительные дополнительные потоки мощности как в прямом, так и обратном направлениях [6].

Эффект объединения ЭЭС Восточно-Азиатского региона. Целесообразность и эффективность

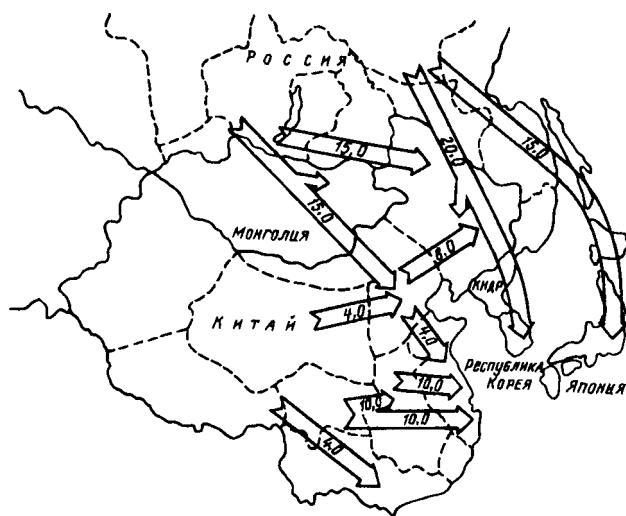


Рис. 2. Схема перспективного обмена электроэнергией между странами и территориями Восточной Азии (ТВт·ч/год)

совместной работы ЭЭС показана многочисленными исследованиями и подтверждается опытом эксплуатации существующих крупных энергообъединений. Как показали исследования, по межгосударственным электрическим связям (МГС) в Восточно-Азиатском регионе может быть реализован эффект объединения ЭЭС с разносезонными максимумами нагрузки. Годовой максимум нагрузки в ЭЭС Японии, Южной Кореи и Юго-Восточного Китая наступает летом, а в ЭЭС Восточной Сибири, Дальнего Востока, Северо-Восточного Китая (СВК) и КНДР — зимой, т.е. их годовые графики нагрузки находятся как бы в противофазе. В силу этого тепловые станции ЭЭС, имеющей, например, зимний максимум нагрузки, могут догружаться летом на значение пропускной способности МГС и эта дополнительная выработка может передаваться в другую систему, вытесняя там из баланса мощности полупиковые ТЭС. В зимний период будет иметь место обратная картина. Таким образом, установленная мощность электростанций в каждой из ЭЭС может быть снижена примерно на значение пропускной способности МГС.

Эффект объединения ЭЭС с разносезонными максимумами нагрузки может быть реализован и при вводе новых мощностей. Мощность новой электростанции, вводимой в объединении ЭЭС с разными сезонами максимума нагрузки, может использоваться в балансах мощностей обеих ЭЭС (в одной — летом, в другой — зимой). При этом на каждый киловатт мощности этой станции из баланса вытесняется в пределах до двух киловатт установленной мощности других электростанций. Данный эффект может быть реализован при сооружении любых электростанций — гидравлических, атомных, приливных (если зарегулирована их энергоотдача). Можно ожидать, что даже наименее экономичные с точки зрения традиционной методологии источники электроэнергии в Восточно-Азиатском регионе (как, например, Тугурская ПЭС) могут оказаться эффективными при учете рассмотренного эффекта.

Потенциальные размеры эффекта объединения ЭЭС с разными сезонами максимумов нагрузки в Восточно-Азиатском регионе весьма велики. Например, по оценкам авторов, только при объединении ЭЭС Южной Кореи и Северо-Восточного Китая данный эффект на уровне 2020 г. с учетом прогнозов развития этих систем может превысить 20 ГВт.

Оценка потенциально возможного значения межсистемного эффекта от совмещения графиков нагрузки при совместной работе ЭЭС Дальнего Востока России и Японии показывает, что обменные потоки по МГС на уровне 2020 г. могли

бы достигать 12 ГВт из Японии в Россию зимой и 15 ГВт в обратном направлении летом. Такой вариант МГС вряд ли пригоден для реализации, но он показывает возможные масштабы получения эффекта от совмещения графиков нагрузок ЭЭС ДВР и Японии [6].

Основные межгосударственные электрические связи в регионе. В настоящее время имеются две слабые МГС 220 кВ, связывающие объединенные электроэнергетические системы (ОЭЭС) Дальнего Востока и Северо-Восточного Китая и ОЭЭС Сибири и Монголии и имеющие локальное значение. Для реализации хотя бы части из указанного объема перетоков необходимо создание мощных МГС между энергосистемами стран региона. Возможная схема таких связей представлена на рис. 1. Трассы этих МГС в основном совпадают с направлениями потоков, приведенных на рис. 2. Конкретные параметры электрических связей (напряжение, пропускная способность, число цепей) должны выявляться в ходе технических и экономических исследований каждой из них с учетом выполняемых ими функций (реализация межсистемных эффектов, транспорт электроэнергии).

Межгосударственные электрические связи имеют две особенности:

значительную протяженность (как правило, превышающую несколько тысяч километров);

существенное различие требований к качеству электроэнергии, методам и средствам оперативного управления в связываемых ЭЭС.

Имеются, как уже отмечалось, отличия и по частоте переменного тока, поэтому указанные электрические связи должны, в основном, выполняться на постоянном токе. Это с одной стороны, снизит потери на передачу, а с другой — обеспечит асинхронную работу объединяемых ЭЭС.

Примеры межгосударственных электрических связей. В СЭИ СО РАН проводились исследования МГС «Россия—Япония» с транспортом электроэнергии от Учурских ГЭС и «Россия—Китай—Южная Корея» — от Приморской АЭС.

В качестве МГС «Россия—Япония» рассматривалась электропередача постоянного тока (ППТ) ± 650 кВ общей длиной около 3000 км с тремя преобразовательными подстанциями: у Учурских ГЭС (для выдачи мощности); в районе Комсомольска-на-Амуре — условном центре электрических нагрузок Дальнего Востока (для реализации эффекта объединения ЭЭС Японии и Дальнего Востока) и в северной части о. Хонсю. С помощью кабельных вставок МГС пересекает проливы: материк — о. Сахалин, о. Сахалин — о. Хоккайдо и о. Хоккайдо — о. Хонсю. Суммарная пропускная способность МГС составляет

10 ГВт.

Учурские ГЭС намечаются к строительству на юге Якутии. Их суммарная мощность может быть доведена до 5 ГВт, а среднемноголетняя выработка составляет 17,2 ТВт·ч/год.

Летом вся мощность Учурских ГЭС передается в Японию, где в этот период электрическая нагрузка максимальна. Этим перетоком в японской ЭЭС вытесняются полуугольные ТЭС на органическом топливе. Зимой, когда в ОЭЭС Дальнего Востока пик электрической нагрузки, а в Японии ее снижение, переток от ГЭС в размере их гарантированной мощности идет в ОЭЭС Дальнего Востока, вытесняя там ТЭС на органическом топливе. При этом передача мощности от ГЭС в Японию не осуществляется. В этот период не предполагается и догрузка японских электростанций с передачей их мощности на Дальний Восток, так как на рассматриваемую перспективу (до 2010—2020 гг.) в дальневосточной ОЭЭС не планируется вводов мощностей конденсационных станций, которые можно было бы вытеснить перетоком мощности из Японии. Таким образом, эффект разносезонных максимумов нагрузки реализуется в данном случае неполностью. Тем не менее, как показали результаты исследования, реализация проекта рассматриваемой МГС позволяет уменьшить объем вводимых в обеих ЭЭС тепловых электростанций (с учетом сокращения суммарного необходимого оперативного резерва) на 10—11,5 ГВт. Экономический эффект от реализации проекта даже при 12%-й ставке дисконтирования остается положительным.

Предполагаемая МГС «Россия—Китай—Южная Корея» предусматривается как ППТ ± 500 кВ с пропускной способностью 3 ГВт и длиной 1800 км. Преобразовательные подстанции мощностью 3 ГВт каждая размещаются около Приморской АЭС и в пунктах отбора мощности в гг. Шэньяне и Сеуле.

Приморская АЭС мощностью 1,3 ГВт с годовой выработкой 9 ТВт·ч планируется к размещению на юге Приморского края. В зимний период она участвует в покрытии электрической нагрузки энергосистем Дальнего Востока и Северо-Восточного Китая всей своей мощностью, вытесняя из энергобалансов этих систем тепловые станции. В этот период, когда в южнокорейской системе уровень электрической нагрузки минимальный, ТЭС Южной Кореи догружаются с передачей их мощности в ЭЭС СВК, где вытесняются ТЭС на органическом топливе. В летний период, когда в ЭЭС Южной Кореи нагрузки максимальны, а в дальневосточной и китайской ЭЭС минимальны, АЭС выдает всю свою мощность в южнокорейскую энергосисте-

му, вытесняя там из энергетических балансов мощности ТЭС. В этот же период на значение свободной части пропускной способности МГС на участке Шэньян—Сеул догружаются ТЭС Северо-Восточного Китая и их выработка передается в Южную Корею, вытесняя там ТЭС на органическом топливе. Таким образом эффект совмещения годовых графиков нагрузки реализуется между ЭЭС СВК и Южной Кореей. В реализации этого эффекта ОЭЭС ДВР не участвует, так как мощность ее ТЭС, как отмечалось, на рассматриваемую перспективу ограничена.

Исследования показали, что ввод Приморской АЭС и МГС с учетом сокращения суммарного необходимого оперативного резерва позволяет сэкономить 7,2 ГВт установленных мощностей во всех объединяемых ЭЭС, в том числе 2,4 ГВт за счет АЭС и 4,8 ГВт за счет эффекта объединения. Проект является абсолютно экономически эффективным, так как обеспечивает более низкие капитальные и ежегодные затраты по сравнению с конкурирующими мероприятиями.

Оба рассмотренных проекта дают также значительный экологический эффект, так как сокращается потребность в органическом топливе и, как следствие, снижаются выбросы в окружающую среду.

В последнее время активно прорабатывается вопрос экспорта электроэнергии из Восточной Сибири в Китай. Для этого предусматривается сооружение ППТ ± 600 кВ пропускной способностью 3 ГВт длиной 2200 км от Братской ГЭС через Иркутск, Гусиноозерск, Улан-Батор (Монголия) в ЭЭС Китая в район Пекина.

Для данной электропередачи специалистами «Иркутскэнерго» были проведены исследования установившихся и динамических режимов Иркутской ЭЭС, которые подтвердили возможность надежно передать в Китай до 3 ГВт мощности при принятых в России запасах устойчивости и показали удовлетворительный характер переходных процессов после разнообразных возмущений. Экономическая эффективность этой электропередачи еще не оценивалась.

Основные направления создания энергообъединения в Восточной Азии. С учетом ранее приведенного можно сформулировать следующие направления и этапы создания энергообъединения.

1. Сооружение отдельных МГС для реализации эффекта объединения ЭЭС с зимними и летними максимумами нагрузки.

В первую очередь создаются МГС, имеющие наименьшую протяженность и вследствие этого наименьшие затраты и наибольшие эффекты. К таким связям прежде всего можно отнести МГС «Южная Корея — КНДР», «Южная Корея —

СВК — ДВР». Сооружение электрической связи «ДВР — Япония», по-видимому, следует отнести на более отдаленную перспективу.

Как представляется, указанные МГС целесообразно сооружать поэтапно, постепенно наращивая их пропускную способность. Это обусловлено тем, что потенциальные эффекты объединения ЭЭС с разносезонными максимумами нагрузки (как это было показано ранее) очень велики и не могут быть исчерпаны при вводе одной даже очень мощной электропередачи.

2. Усиление созданных ранее МГС и сооружение новых для выдачи электроэнергии вновь вводимых электростанций (в том числе на базе возобновляемых энергоресурсов ДВР).

В первую очередь сооружаются наиболее эффективные электростанции, такие как, например, Приморская АЭС, мощность которой может быть использована на ДВР и передана по МГС в СВК и Южную Корею. Затем следуют Учурские ГЭС, в перспективе Тугурская ПЭС, энергоотдача которых также может использоваться на Дальнем Востоке и экспортироваться по МГС в Японию и другие страны Восточно-Азиатского региона.

3. Дальнейшее усиление электрических связей между территориями и странами Восточно-Азиатского региона (например, между Японией и Южной Кореей). При этом реализуются дополнительные эффекты объединения ЭЭС, включая совмещение суточных графиков электрической нагрузки, повышение экономичности режимов работы энергооборудования и т.д.

С созданием указанных МГС структура системообразующих линий электропередачи Восточно-Азиатского энергообъединения принимает практически кольцевую форму. Образуется несколько вложенных друг в друга колец. Два из них замыкаются в пределах материка, связывая ЭЭС России, Китая, Монголии, КНДР и Южной Кореи. Третье выходит за пределы материка и замыкается через Сахалин и Японские острова, присоединяя дополнительно к энергообъединению ЭЭС Японии (см. рис. 1).

Следует обратить внимание на специфичность структуры основной электрической сети формирующегося межгосударственного энергообъединения в Восточно-Азиатском регионе. В отличие от других регионов (Европа, Северная Америка), где связи между частями энергообъединений формируются с использованием относительно коротких ППТ, вставок постоянного тока, совместным использованием электропередач переменного и постоянного тока, в Восточной Азии крупные национальные или территориальные ЭЭС, сформировавшиеся на переменном токе, предполагается объединять в основном длинными ППТ, не примыкающими друг к другу непосред-

редственно. Эта особенность предопределяет дополнительную специфичность режимов Восточно-Азиатского энергообъединения и процессов управления этим энергообъединением.

Проблемы формирования Восточно-Азиатского энергообъединения. Изложенное дает основания полагать, что в Восточной Азии есть реальные предпосылки для создания уникального межгосударственного объединения ЭЭС, которое дает возможность рационально использовать энергетические ресурсы региона при высокой эффективности межгосударственных электрических связей. Вместе с тем, успешная реализация этого замысла зависит от решения целого ряда проблем и отдельных вопросов политического, экономического и технического характера.

Передача больших мощностей связана с такими проблемами, как энергетическая независимость и энергетическая безопасность стран, принимающих большие потоки мощности.

Требуют специального внимания такие вопросы, как надежность работы энергообъединений при мощных электрических связях, распределение больших мощностей в пунктах приема, совместная работа энергообъединения на постоянном и переменном токе, причем необходимы сравнительные оценки линий на постоянном и переменном токе, в том числе настроенных электропередач.

Потребуется проработка вопросов, связанных с координацией развития объединенных энергосистем и их совместного управления, в том числе по распределению затрат на реализацию того или иного проекта и разделению эффектов между участниками объединения.

Успешное решение технических и экономических проблем будет зависеть прежде всего от степени доверительности во взаимоотношениях между странами-партнерами, что потребует постоянного улучшения и поддержания на высоком уровне политического климата в регионе.

Для решения указанных проблем необходимо проведение многочисленных комплексных исследований, прежде всего совместно специалистами стран Восточно-Азиатского региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rudenko Yu.N., Yershevich V.V. Is it possible and expedient to create a global energy network? — Int. J. of Global Energy Issues, 1991, V. 3, № 3.
2. Energy for tomorrow's world. The World Energy Council Commission. — Preliminary Discussion Paper. Sept. 1991. New Lodge (UK), 1991.
3. Ершевич В.В., Шил Санкар Чандра. Объединение энергосистем стран Азии — возможный шаг к созданию единой энергосистемы мира. — Энергохозяйство за рубежом,

1991, № 5.

4. Paik K.-W. — Japan, Korea and the development of Russian Far Eastern energy resources. — The J. of Energy and Development, 1991, V. 16, № 2.

5. Ершевич В.В. Энергосистемы Китая и перспективы их связей с энергосистемами России. — Электрические станции, 1994, № 6.

6. Voropai N.I., Gumbin V.A., Efimov D.N. System aspects of creating the East-Asian electric power interconnection. — IEE of Japan Power and Energy Conf. Proc., July 27–29, 1994, Tokyo.

7. Ties in the North-Eastern Asia / L.S. Belyaev, G.F. Kovalev, L.M. Lebedeva, S.V. Podkvalnikov. — Perspectives in Energy, 1994–1995, Vol. 3.

8. Хаями М. Развитие районов Дальнего Востока и наши надежды. — Индустрия и бизнес Японии, 1992, № 6.

9. Electric Power Industry in China — China Electric Power Press. — Beijing, 1996.

10. China's construction in four decades (1949–1989). Vol. X. Electric Power Industry in China. — Beijing, MOE, MWR, 1990.

11. Zheng M. Solution to operation problems of 500 kV power system in China. 2-nd SEI-EPRI Seminar on Methods for Solving the Problems on Energy Power System Development and Control. — Irkutsk, Russia, Aug. 31 — Sept. 4, 1992.

12. Региональные энергетические программы: методические основы и опыт разработки / Под ред. Б.Г. Сансева. — Новосибирск: Наука, 1995.

13. Агеева Е.А., Ершевич В.В., Лебедев Б.П. Электроэнергетика мира в 1992 г. — Электрические станции, 1995, № 2.

14. Electric power industry in Japan. — 1994/95. Tokyo: Japan Electric Power Information Center, Inc., 1994.

[25.09.97]

Авторы: Беляев Лев Спиридонович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1950 г. В 1969 г. защитил докторскую диссертацию «Оптимальное управление электроэнергетическими системами, содержащими ГЭС, с применением вероятностных методов». Заместитель директора Сибирского энергетического института (СЭИ) СО РАН.

Воропай Николай Иванович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 1966 г. В 1990 г. защитил докторскую диссертацию «Методы анализа и исследование динамических свойств электроэнергетических систем при существенных структурных изменениях и больших возмущениях». Директор СЭИ СО РАН.

Подковальников Сергей Викторович окончил энергетический факультет Иркутского политехнического института в 1980 г. В 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию «Развитие комплексного подхода к обоснованию решений в энергетике: учет многокритериальности и неопределенности информации». Старший научный сотрудник СЭИ СО РАН.

Шутов Георгий Васильевич окончил электромеханический факультет ЛПИ в 1962 г. Старший научный сотрудник СЭИ СО РАН.

Применение регрессионных моделей для оценки потерь электроэнергии от межсистемных перетоков

ФИЛИППОВ С.А., КАПИШНИКОВА Т.В.

Приведены определение и анализ составляющей потерь мощности от протекания межсистемных перетоков в электроэнергетических системах с использованием коэффициентов токораспределения и регрессионных зависимостей. Дана сравнительная характеристика этих методов. Приводится краткий обзор методик расчета и пример для тестовой схемы.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, потери мощности, межсистемные перетоки, регрессионные модели

Создание рынка перетоков и внедрение хозяйственных отношений привело к необходимости более тщательного учета перетоков энергии между подразделениями РАО ЕЭС, имеющими хозяйственную самостоятельность. Организация взаиморасчетов и определения ответственности за экономичность ведения режимов и использования оборудования потребовали уточнения ряда спорных вопросов. В частности, одной из таких проблем является разделение суммарных потерь мощности и энергии в объединенной энергосистеме между юридическими лицами, участвующими в процессе передачи и распределения электроэнергии. Управление перетоком осуществляет, как правило, подразделение РАО. Однако из-за электрической связи сетей различного напряжения изменение перетоков сказывается и на значениях потоков энергии по сетям АО, а это, в свою очередь, приводит к изменению технологического расхода энергии на транспорт (потерь энергии).

Таким образом, задача состоит в выделении из общих потерь составляющей, связанной с протеканием межсистемных перетоков (МП). Приборами учета и измерительными системами удается зафиксировать только суммарное значение потерь без разделения ее на составляющие. Анализ ответственности каждого подразделения РАО за размер потерь энергии возможно выполнить только расчетным путем. Расчетная характеристика определения потерь для учета их в стоимости энергии для АОэнерго складывается из следующих составляющих:

$$\begin{aligned}\Delta W &= \Delta W_{0,4-110} + \Delta W_{\text{тр}} + \Delta W_{\text{проч}} + \Delta W_{\text{м.п}} = \\ &= \Delta W_{\text{н}} + \Delta W_{\text{м.п}},\end{aligned}\quad (1)$$

где ΔW — суммарные потери для энергосистемы;

The paper deals with a determination and an analysis of the component of power losses due to intersystem flows in electrical power systems with the use of current distribution coefficients and regression equations. A comparative characteristic of the methods mentioned above is given. Brief review of calculation methods and an example for a test circuit are given.

Key words: electrical power systems, power losses, intersystem power flows, regression models

$\Delta W_{0,4-110}$ — потери в сетях 0,4–110 кВ; $\Delta W_{\text{тр}}$ — потери в трансформаторах; $\Delta W_{\text{проч}}$ — потери в элементах, не включаемых в схемы замещения (например, синхронных компенсаторов, трансформаторов тока и трансформаторов напряжения и пр.); $\Delta W_{\text{м.п}}$ — дополнительные потери от протекания межсистемных перетоков по ЛЭП, режимы которых задаются вышестоящими по диспетчерской иерархии подразделениям; $\Delta W_{\text{н}}$ — потери от протекания токов на грузки.

В [1] предлагается для разделения суммарных потерь на составляющие, которые зависят от нагрузок и транзитных перетоков использовать коэффициенты токораспределения. В статье описывается методика решения задачи с использованием нормативных характеристик потерь мощности и энергии (НХПЭ).

Идея метода состоит в построении на основании расчета серии характерных режимов регрессионных зависимостей (РЗ) суммарных потерь мощности от нагрузок в МП и последующем разделении их на составляющие [2]:

$$\Delta P_i = f(P_{\text{н}i}, P_{\text{м.п}i}), \quad (2)$$

где ΔP_i — значение потерь мощности в сети в i -й час расчетного периода, оцениваемое по РЗ; f — эмпирическая функция, связывающая изменение результирующего признака (потерь) и наблюдаемых факторов (нагрузок, МП); $P_{\text{н}i}$, $P_{\text{м.п}i}$ — значения нагрузок и МП в i -м режиме.

Переход к потерям энергии ΔW осуществляется суммированием часовых значений потерь мощности за расчетный период.

Выделение потерь от межсистемных перетоков производится как разность значений параметров реального и базового режимов. За базовый режим принимается один из реальных режимов сети

при характерных значениях межсистемных перетоков и нагрузок в соответствующие часы суток. Число базовых режимов зависит от диапазонов изменения нагрузок, направлений и значений межсистемных перетоков. Базовые режимы изменяются также по сезонам.

Линеализируя функцию (2) в точке, соответствующей базовым значениям, и пользуясь частными производными влияния изменения каждого фактора на значения потерь, получаем формулы для оценки изменения потерь при изменении факторов (нагрузок и межсистемных перетоков):

$$\delta \Delta P_i = \partial \Delta P / \partial P_{hi} (P_{hi} - P_{h.б}) + \partial \Delta P / \partial P_{m.пi} (P_{m.пi} - P_{m.п.б}), \quad (3)$$

где $\delta \Delta P_i$ — изменение потерь в i -м режиме по сравнению с базовым; $\partial \Delta P / \partial P_{hi}$, $\partial \Delta P / \partial P_{m.пi}$ — частные производные потерь мощности по собственной нагрузке и межсистемным перетокам; P_{hi} , $P_{h.б}$ — собственная нагрузка системы в i -м базовом режимах; $P_{m.пi}$, $P_{m.п.б}$ — межсистемные перетоки в i -м базовом режимах.

В частном случае, когда зависимость (2) принимает вид полинома, можно частные производные заменить конечными разностями и тогда выражение для оценки влияния изменения каждого фактора на значение потерь мощности определяется как разность расчетов потерь при реальных и базовых значениях факторов:

$$\delta \Delta P = \Delta P_i - \Delta P_б = (\Delta P_{hi} - \Delta P_{h.б}) + (\Delta P_{m.пi} - \Delta P_{m.п.б}) = \delta \Delta P_{hi} + \delta \Delta P_{m.пi}, \quad (4)$$

где ΔP_{hi} , $\Delta P_{h.б}$ — потери мощности в сети от токов нагрузки в i -м и базовом режимах; $\Delta P_{m.пi}$, $\Delta P_{m.п.б}$ — потери мощности, связанные с протеканием межсистемных перетоков в i -м и базовом режимах; $\delta \Delta P_{hi}$ — изменение потерь, обусловленные изменением нагрузок; $\delta \Delta P_{m.пi}$ — изменения потерь, обусловленные изменением МП.

С использованием регрессионных зависимостей потерь мощности в сети оценка составляющих в формуле (4) производится по следующим выражениям:

$$\left. \begin{aligned} \delta \Delta P_{hi} &= f(P_{hi}, P_{m.п.б}) - f(P_{h.б}, P_{m.п.б}); \\ \delta \Delta P_{m.пi} &= f(P_{h.б}, P_{m.пi}) - f(P_{h.б}, P_{m.п.б}), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $f(P_{hi}, P_{m.п.б})$ — оценка потерь по РЗ при значениях факторов P_{hi} и $P_{m.п.б}$; $f(P_{h.б}, P_{m.п.б})$ — оценка потерь по РЗ при значениях факторов $P_{h.б}$ и $P_{m.п.б}$; $f(P_{h.б}, P_{m.пi})$ — оценка потерь по РЗ при значениях факторов $P_{h.б}$ и $P_{m.пi}$.

Используя описанный подход, можно оценить

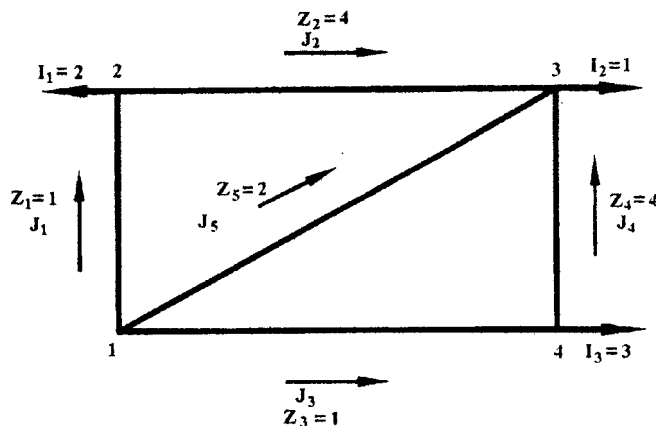


Схема сети: Z — сопротивление линии, Ом; I — задающие токи в узлах, А; J — токи в линиях, А

влияние изменения каждого перетока на величину потерь в ЭЭС.

Пример 1. Для схемы, представленной на рисунке и использованной в [1] для иллюстрации метода коэффициентов токораспределения, найдем составляющие потерь. На схеме указаны все необходимые параметры сети. Все формулы для расчета коэффициентов токораспределения взяты из [1]. Считаем, что потери мощности в каждой линии обусловлены задающими токами узлов.

Определяем матрицу токораспределения

$$T = Y_B \times M_i \times Y^{-1} \times I_d = Z \times I_d:$$

$$T = \begin{vmatrix} 1 & & \\ & 0,25 & \\ & & 1 \\ & & & 0,25 \\ & & & & 0,5 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0,8444 & 0,2222 & 0,0444 \\ 0,2222 & 1,1111 & 0,2222 \\ 0,0444 & 0,2222 & 0,8444 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 1,6889 & 0,2222 & 0,1333 \\ -0,3111 & 0,2222 & 0,1333 \\ 0,0899 & 0,2222 & 2,5333 \\ 0,0899 & 0,2222 & -0,4667 \\ 0,2222 & 0,5556 & 0,3333 \end{vmatrix}.$$

Прямоугольная матрица коэффициентов увеличения потерь от каждого задающего тока узла в ветвях схемы α

$$\alpha_{ki} = 1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} (J_{ia} \times J_{ja} + J_{ip} \times J_{jp}) / J_i^2:$$

$$\alpha = \begin{vmatrix} 1,21 & 9,201 & 15,336 \\ 0,143 & 0,199 & 0,333 \\ 31,29 & 12,8 & 1,123 \\ -1,711 & -0,7 & 0,333 \\ 5,001 & 1,999 & 3,333 \end{vmatrix}.$$

Матрица составляющих потерь в ветвях схемы

$$\Delta P_B = R_d \times |\alpha T^2| =$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & & & \\ & 4 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \\ & & & & 2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 3,4528 & 0,4543 & 0,2725 \\ -0,0138 & 0,00985 & 0,00593 \\ 0,2529 & 0,6320 & 7,2057 \\ -0,0138 & -0,0346 & 0,0726 \\ 0,2469 & 0,6173 & 0,3703 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 3,4528 & 0,4543 & 0,2725 \\ -0,0552 & 0,0394 & 0,0237 \\ 0,2529 & 0,6320 & 7,2057 \\ -0,0553 & -0,1383 & 0,2905 \\ 0,4938 & 1,2346 & 0,7406 \end{vmatrix}.$$

Матрица составляющих потерь, вызванных задающими токами узлов и протеканием межсистемных перетоков, будет равна:

$$\Delta P_{м.п} = \begin{vmatrix} 4,0890 \\ 2,2221 \\ 8,5330 \end{vmatrix}.$$

Суммарные потери в сети $\Delta P = 14,844$ МВт.

Пример 2. Произведем оценку составляющих суммарных потерь для этой же схемы с использованием РЗ.

Для схемы (см. рисунок) были проведены расчеты по полному факторному эксперименту и дополнительной контрольной выборке серии режимов с различными сочетаниями задающих токов I_1, I_2, I_3 (табл. 1).

Таблица 1

Номер	Значение тока, А			Значение, потерь, МВт
	I_1	I_2	I_3	
1	1	0,5	1,5	3,616
2	3	0,5	1,5	11,278
3	1	1,5	1,5	6,987
4	3	1,5	1,5	15,677
5	1	0,5	4,5	21,011
6	3	0,5	4,5	29,344
7	1	1,5	4,5	26,022
8	3	1,5	4,5	35,425
9	2	1	3	15,068
10	2	1,5	4,5	29,768
11	1	1	1,5	4,993
12	3	1	4,5	32,064
13	1	0,5	3	9,999
14	3	1,5	3	23,185
15	2	0,5	1,5	6,497

После обработки результатов было получено уравнение зависимости потерь мощности от задающих токов узлов:

$$\Delta P = 0,125417 I_1 + 1,02413 I_1^2 - 0,386368 I_2 +$$

$$+ 2,51254 I_2^2 - 0,67499 I_3 + 1,13984 I_3^2.$$

В этом уравнении два первых слагаемых оценивают влияние тока I_1 на суммарные потери в сети, вторые и третьи пары — соответственно токов I_2 и I_3 . Если принять базовые токи равными нулю, то, задавая значениями текущих токов из примера 1, можно оценить суммарные потери в сети и влияние каждого из задающих токов. Например, при $I_1=2, I_2=I_3=0$ можно определить долю тока I_1 в суммарных потерях мощности.

Сравнение результатов расчетов потерь мощности по примерам 1 и 2 сведены в табл. 2.

Таблица 2

Метод расчета	Значение потерь, МВт			
	от задающих токов	узлов	суммарные	
	ΔP_{y1}	ΔP_{y2}	ΔP_{y3}	ΔP
По регрессионной модели (1)	4,3474	2,126	8,23336	14,707
По коэффициентам токораспределения (2)	4,089	2,2221	8,533	14,8441
Погрешность (1) по отношению к (2), %	-6,32	4,32	3,51	0,92

Аналогичные результаты были получены при проведении расчетов для ряда других тестовых схем и реальной сети одной из энергосистем Северного Кавказа.

Заключение. Сравнительный анализ результатов показали, что расхождение для всех тестовых схем по РЗ и расчету по коэффициентам токораспределения не превышает 10%. Это доказывает работоспособность оценки потерь по регрессионным зависимостям. Расчеты по коэффициентам токораспределения более трудоемки и требуют разработки специального программного обеспечения для реальных электрических сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппова Т.А., Азаров В.С. Потери электроэнергии от транзитных перетоков в электрических сетях. — Электричество, 1990, № 4.
2. Грисько И.В., Идельчик В.И., Филиппов С.А. Оценка потерь мощности и энергии в ЭЭС от межсистемных перетоков. — Региональные проблемы повышения качества и экономии электроэнергии: Тезисы докладов научно-практической конференции, Астрахань: АТИРПиХ, 1991.
3. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

[27.06.97]

Авторы: Филиппов Сергей Альбионович окончил энергетический факультет Иркутского политехнического института в 1973 г. В 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию в Новочеркасском политехническом институте по теме «Метод определения потерь мощности и энергии в электрических сетях 6—220 кВ». Доцент Ставропольского государственного технического университета (СтГТУ).

Капишников Татьяна Валентиновна окончила энергетический факультет Ставропольского политехнического института в 1982 г. Работает в СтГТУ в должности инженера.

Определение оптимальных мест размыкания в распределительных сетях

ПОНОМАРЕНКО И.С., ДЕРИЙ И.А.

Для распределительных сетей 10(6)/0,4 кВ рассмотрены алгоритмы определения оптимальных мест их размыкания исходя из критерия минимума потерь мощности в сети. Предложены экспресс-методы определения мест размыкания для сетей большой размерности, основанные на определении «экономических» ЭДС и оптимизационном анализе графов этих сетей. Рассмотрена программная реализация и практическая эффективность предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, оптимальные места размыкания, потери мощности

Распределительные сети (РС) 6–10/0,4 кВ систем электроснабжения городов и промышленных предприятий в подавляющем большинстве случаев работают в разомкнутом режиме. Выбор оптимальных мест размыкания (ОМР) РС зависит от большого числа факторов: удобства выполнения оперативных переключений, обеспечения необходимого уровня надежности электроснабжения и т.д. Одним из основных критериев при этом является минимум потерь мощности и электроэнергии в сети.

Задачу выбора ОМР приходится решать как при планировании режимов РС, например, при «выборе схемы на максимум», так и для функции «реального времени» АСДУ (при управлении их послеаварийными режимами и т.д.). В зависимости от условий ее решения существенно изменяются требования к быстродействию и точности используемых алгоритмов. Особенно остро вопрос быстродействия возникает при решении задач реального времени для АСДУ РС. Это объясняется как жесткими требованиями к допустимому времени принятия решения, так и большими размерами современных РС, число подстанций в которых может быть более тысячи. Поэтому задача разработки ускоренных экспресс-методов выбора ОМР, обладающих приемлемой точностью и ориентированных на использование в функции реального времени в РС большого размера, является весьма актуальной.

Выбор ОМР производится, как правило, при допущении о подобии графиков электрических нагрузок в узлах РС, что позволяет перейти от оптимизации по критерию минимума потерь энергии ($\Delta W \rightarrow \min$) к критерию минимума потерь мощности ($\Delta P \rightarrow \min$). При этом, с одной стороны, упрощаются сами алгоритмы оптимизации, а с другой отпадает необходимость подробного описания графиков электрических нагрузок РС, ин-

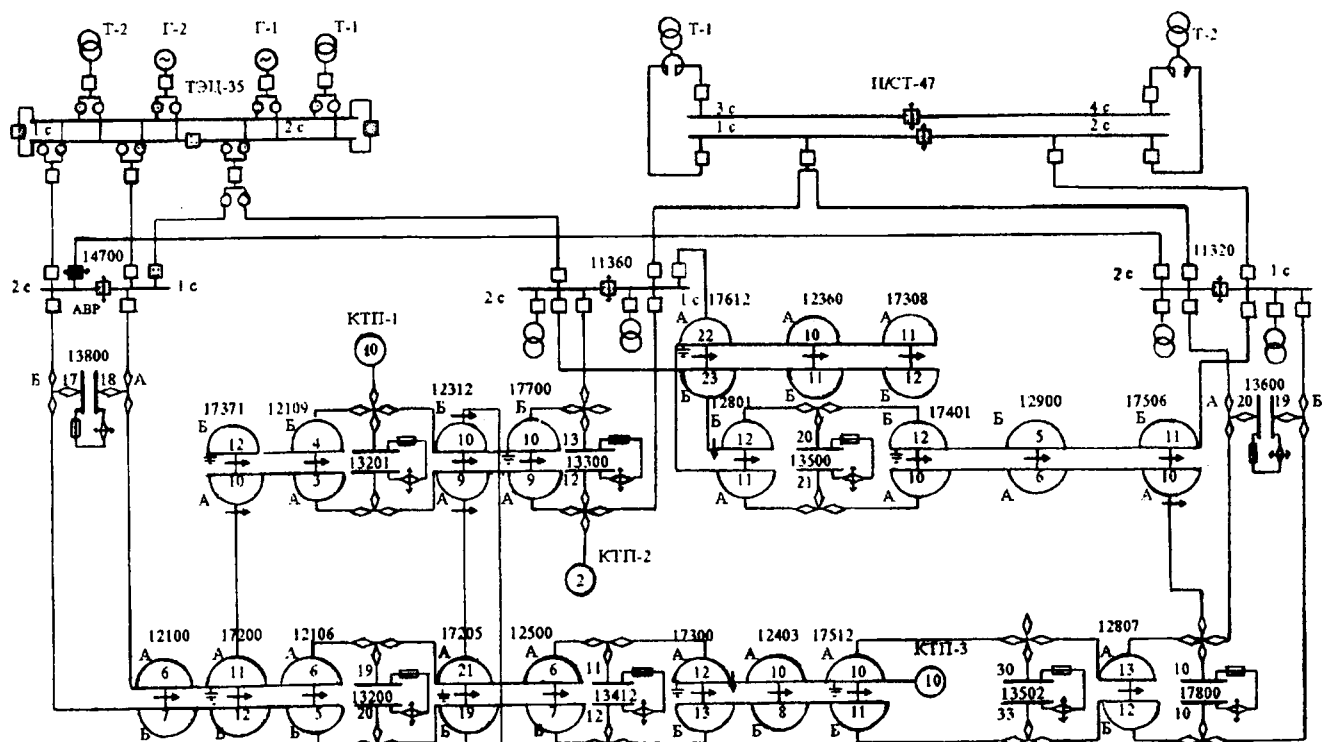
Algorithms for determining normal cuts (NCD) in 10(6)/0,4 kV distribution electrical networks are considered proceed from the criterion of minimum of power losses. Express-methods for NCD for large scale networks are proposed. The methods are based on a determining «economic» EMF and optimization analysis of graphs. A software realization and practical efficiency of the methods proposed are considered.

Key words: distribution electrical networks, normal cuts, power losses

формация о которых обычно очень ограничена, поэтому на первом этапе решения задачи выбора ОМР РС такой подход можно считать вполне допустим.

Один из алгоритмов, позволяющий получить при указанных ограничениях наиболее точное решение задачи, описан в [1]. Он основан на методе ветвей и границ, который определяет глобальный экстремум для задачи численного программирования, к которым и относится рассматриваемая задача выбора ОМР. Однако его реальная область применения ограничивается смешанными сетями (присутствуют и кабельные, и воздушные линии) небольшого размера с высокой степенью неоднородности, которая определяется отношением реактивных и активных сопротивлений $x_j/r_j \neq \text{idem}$ для всех линий, характерных для сельского электроснабжения (до 100 подстанций). Для городских и промышленных сетей, состоящих в основном из кабельных линий, однородность сети значительно выше, чем для смешанных сетей. Как показал опыт расчетов, это приводит к тому, что при работе данного алгоритма с таким типом сетей резко снижается число отсеиваемых вариантов размыкания сети с заведомо высокими потерями, которые не могут войти в глобальный экстремум. Практически алгоритм вырождается в полный перебор всех возможных вариантов, что неприемлемо даже для сетей небольших размерностей, тем более он не может быть практически использован для анализа реальных городских сетей большого размера.

Результаты выбора ОМР с помощью метода ветвей и границ приведены на примере тестовой схемы, изображенной на рисунке. Эта схема характерна для систем электроснабжения крупных городов, выполненных кабельными линиями по автоматизированному двухлучевому принципу. Полученные результаты — места оптимального



Условные обозначения:



-двухлучевая ТП типа
2ТО-400, ТК-2х400;
цифры означают
токовую нагрузку ТП
со стороны высокого
напряжения;



-ТП типа БКТУ;

□ -ячейка с масляным выключателем

■ -КА отключен;

○ -ячейка с разъединителем;

◇ -ячейка с выключателем нагрузки;

⬆⬆ -двухсторонний АВР на ВН с перевернутыми пружинами;

⬆ -предохранитель;

⬆ -силовой трансформатор;

⬆ -нормальное деление сети;

⬆⬆ -двухсторонний АВР на МВ.

Тепловая схема Московской кабельной сети

размыкания и суммарное значение потерь мощности в линиях сети для этого выбранного режима — приведены в таблице. Время для получения одного итогового решения составило несколько часов процессора на ПЭВМ 486.

Для выбора ОМР в РС большого размера может быть использован градиентный метод [2], основанный на определении «экономических» ЭДС во всех контурах сети, которые корректируют потокораспределение в замкнутой сети, получающееся неоптимальным вследствие ее неоднородности, и приводят его к оптимальному. Алгоритм состоит из нескольких выполняемых последовательно шагов:

1) рассчитывается режим замкнутой части сети (в начале расчета все ветви замкнуты);

2) определяются «экономические» ЭДС во всех имеющихся контурах сети;

3) для контура с максимальной «экономической» ЭДС находится ветвь с минимальной нагрузкой, которая и размыкается.

Процедура выполняется итеративно до тех пор, пока вся сеть не станет разомкнутой, т.е. число итераций равно числу контуров в исходной анализируемой сети, когда все ее ветви замкнуты.

Достоинством данного метода является точно известное заранее число операций, которое необходимо выполнить для получения решения. Основные недостатки:

получаемое решение может оказаться не глобальным, а локальным экстремумом;

большое (хоть и на несколько порядков мень-

Номер	Оптимальные места размыкания сети при применении методов			
	ветвей и границ	«экономических» ЭДС	модернизированного метода «экономических» ЭДС	экспресс-метода
1	14700(2с)-11320(2с)	14700(2с)-11320(2с)	14700(2с)-11320(2с)	14700(2с)-11320(2с)
2	17300(Б)-12403(Б)	12403(Б)-17512(Б)	12500(А)-13412(А)	12403(Б)-17512(Б)
3	12403(А)-17512(А)	17300(А)-12403(А)	17300(Б)-12403(Б)	12403(А)-17512(А)
4	17205(А)-12312(А)	17205(А)-12312(А)	17205(А)-12312(А)	17205(А)-12312(А)
5	17700(А)-13300(А)	12312(Б)-17700(Б)	17205(Б)-12312(Б)	17205(Б)-12312(Б)
6	12312(А)-17700(А)	12312(А)-17700(А)	12312(А)-17700(А)	12312(А)-17700(А)
7	13500(Б)-17401(Б)	13500(Б)-17401(Б)	13500(Б)-17401(Б)	13500(Б)-13412(Б)
8	17401(А)-12900(А)	13500(А)-17401(А)	13500(А)-17401(А)	13500(А)-17401(А)
ΔР, кВт/отн. ед.	233,2/1,0	224,1/1,004	235,3/1,054	228,9/1,025

ше по сравнению с методом ветвей и границ) число операций для получения решения; только число расчетов режимов сети равно двойному числу замкнутых контуров в сети и может составлять несколько сотен и даже тысяч.

Результаты выбора ОМР с помощью метода «экономических» ЭДС так же приведены в таблице.

Опыт работы данной программы с реальными РС размером несколько сотен узлов и больше показал, что ее непосредственное использование в функции реального времени АСДУ затруднено, так как требует значительных вычислительных ресурсов (десятки минут процессорного времени). Для преодоления этого был разработан модифицированный алгоритм метода «экономических» ЭДС, который заключается в следующем.

В начале расчета все ветви сети замкнуты. Рассчитывается «экономический» режим замкнутой сети, соответствующий минимуму потерь мощности [3]:

$$I = C \cdot J + Y_{с.в} \cdot \Delta E_{эк}, \quad (1)$$

где I — искомая матрица токов ветвей сети; J — матрица задающих токов в узлах сети; $\Delta E_{эк}$ — матрица «экономических» ЭДС в ветвях сети; C — матрица коэффициентов распределения; $Y_{с.в}$ — матрица собственных и взаимных проводимостей.

Используя современные методы операций со слабо заполненными матрицами [4], получение решения с помощью (1) может осуществляться очень быстро. Матрица $\Delta E_{эк}$ определяется обычным способом [2], для чего затрачивается дополнительное время, примерно равное времени одного расчета режима сети. Так как полученный режим с точки зрения потерь является оптимальным, то ветви, в которых потери в замкнутом «экономическом» режиме максимальны, должны остаться включенными и в разомкнутом режиме, чтобы потери в сети после размыкания остались минимальными. С этой целью для определения мест размыкания сети и ее перевода в разомкнутый режим на замкнутом графе сети строится дерево минимальных путей. В качестве «длины» каждой ветви принимается величина, обратная потерям мощности в данной ветви в «экономическом» режиме. Полученное таким образом дерево сети соответствует искомому разомкнутому состоянию и однозначно решает задачу выбора ОМР.

Следует отметить высокое быстродействие данного алгоритма. Для получения решения требуется время, эквивалентное всего двум расчетам режима сети. Результаты расчета с помощью этого алгоритма для той же тестовой схемы так же приведены в таблице. Расхождение результатов лежит в пределах точности задания исходных данных о нагрузках и параметрах сети.

Дальнейшие исследования в этом направлении позволили предложить упрощенный экспресс-ме-

тод выбора ОМР, который может быть использован для анализа городских и промышленных РС, характеризующихся высокой степенью однородности. Его отличие от предыдущего состоит в том, что расчет «экономического» режима выполняется не по (1) с использованием «экономических» ЭДС, а на основе нормально замкнутой R-схемы, т.е. исходной схемы сети, в которой все ветви замкнуты и реактивные сопротивления всех ветвей равны нулю. Определение мест размыкания осуществляется аналогично предыдущему методу путем построения дерева минимальных путей по «длинам» линий, равным обратным значениям потерь мощности в «экономическом» режиме. Результаты расчета с помощью экспресс-метода также приведены в таблице. Время получения решения с его помощью не превышает времени одного расчета режима сети, что особенно важно для задач реального времени АСДУ.

Как уже отмечалось ранее, предложенные алгоритмы разработаны исходя из предположения о подобии графиков электрических нагрузок в электрической сети, что позволило перейти от оптимизации минимума потерь энергии к минимуму потерь мощности. Вместе с тем современные экономические преобразования приводят к существенным изменениям формы графиков электрических нагрузок традиционных потребителей. Например, бурное развитие сферы услуг в традиционных «спальных» районах городов привело к тому, что первые этажи жилых домов занимают под офисы, предприятия питания, быта и т.д. В результате этого изменяются традиционные графики и режимы электропотребления таких домов. Все это приводит к необходимости более детального изучения современных режимов и графиков электропотребления потребителей, их более полного учета в решении задач выбора ОМР, что несомненно должно быть учтено в дальнейших исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нгуен Динь Хао. Метод выбора оптимальных мест размыкания электрических сетей. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1986, № 5.
2. Холмский В.Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. — М.: Высшая школа, 1975.
3. Электрические системы. Т. 2. Электрические сети / Под ред. В.А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1971.
4. Слабозаполненные матрицы. Анализ электроэнергетических систем / А. Брамеллер и др. — М.: Энергия, 1979.

[26.06.97]

А в т о р ы: Пономаренко Игорь Степанович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1976 г. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Учет вероятностного характера изменения нагрузок при моделировании процессов развития аварий в электрических системах» в МЭИ. Доцент кафедры электроэнергетических систем МЭИ.

Дерий Инна Анатольевна окончила ЭЭФ МЭИ в 1996 г. Аспирант кафедры электроэнергетических систем МЭИ.

Работа линейного синхронного электродвигателя от сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии

РУБИНРАУТ А.М., БУРБАЕВА Н.В., ВЕСЕЛОВСКИЙ А.С., ЗЕНКЕВИЧ В.Б., КИРЬЕНИН И.А.

Рассмотрены электромеханические процессы при работе линейного синхронного электродвигателя от сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии. Разработана математическая модель и исследованы соотношения параметров электродвигателя и накопителя энергии. Показано, что применение сверхпроводящего накопителя даст возможность осуществить электромеханический разгон аэрокосмического самолета.

Ключевые слова: линейный синхронный двигатель, сверхпроводниковый накопитель энергии, параметры, расчет

Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии (СПИНЭ) — новое электротехническое устройство, позволяющее разделить во времени процессы медленного накопителя энергии в магнитном поле и быстрого вывода ее с высоким КПД. Замечательные свойства СПИНЭ делают перспективным их применение в промышленных энергосистемах для повышения статической и динамической устойчивости, регулирования активной и реактивной мощности и выравнивания нагрузки электрических станций. Наряду с этим в современной инженерной практике существует потребность в реализации больших мощностей в относительно короткие промежутки времени.

Примером такого применения СПИНЭ может быть энергоснабжение стартовых или разгонных электромеханических устройств [1, 2]. В этом случае преобразование электрической энергии в механическую осуществляется с помощью линейного синхронного электродвигателя, подключенного к СПИНЭ через полупроводниковый преобразователь частоты. Процессы, происходящие в синхронном линейном электродвигателе, были рассмотрены в ряде работ, посвященных проблемам высокоскоростного наземного транспорта [3]. Как известно, линейный синхронный электродвигатель свободен от недостатков, присущих линейному асинхронному двигателю. Применение сверхпроводникового индуктора позволяет увеличить зазор между путевым полотном и экипажем до 200 мм. Подвешивание экипажа осуществляется в результате взаимодействия магнитного поля, создаваемого сверхпроводящими соленоидами с пассивными путевыми контурами, расположенными по обеим сторонам путевого полотна [4]. Сила тяги создается взаимодействием магнитного поля сверхпроводящего индуктора, расположенного на экипаже, с путевым по-

The paper considers electromechanical processes in a linear synchronous electrical motor supplied from a superconducting inductive energy storage. The mathematical model has been developed and the correlations of the motor and energy storage parameters are investigated. It is shown that the application of the energy storage device considered makes it possible to realize an electromechanical launch of an air-space craft.

Key words: linear synchronous motor, superconductivity inductive energy storage, parameters, calculation

лотном, выполненным в виде трехфазной обмотки якоря синхронного линейного электродвигателя. Тяговая система состоит из отдельных участков, получающих энергопитание от тяговой преобразовательной подстанции в момент нахождения на них экипажа. Значения тягового усилия, а следовательно, и тока в обмотке якоря поддерживаются постоянными. В нашем случае, т.е. при питании обмотки от СПИНЭ, условия работы совершенно другие, так как вывод энергии сопровождается уменьшением тока и увеличением напряжения, пропорциональным скорости изменения тока. Это обстоятельство требует специального подхода к решению задачи. Поэтому возникла необходимость анализа электромеханических процессов, исследования основных параметров и энергетических соотношений всего электротехнического комплекса.

Электрическая схема комплекса показана на рис. 1. Сверхпроводящие индуктивные накопители 1 подключаются к мощной энергосистеме с помощью трехобмоточных трансформаторов 2. Вторичная обмотка трансформатора подключена к цепи постоянного тока с помощью трехфазного выпрямителя 3 и инвертора 4. Линейный двигатель подключается с помощью инвертора 5, последовательно включенного в цепь постоянного тока. Для этого используется трехфазная мостовая схема с выходом на обмотку якоря линейного синхронного двигателя 6, который обеспечивает разгон экипажа на первом участке пути. Последующий участок пути получает энергопитание от второго индуктивного накопителя 8 с аналогичной электрической схемой. Индуктор линейного синхронного электродвигателя 7 представляет собой платформу, на которой установлена многополюсная система, состоящая из сверхпроводящих короткозамкнутых соленоидов,

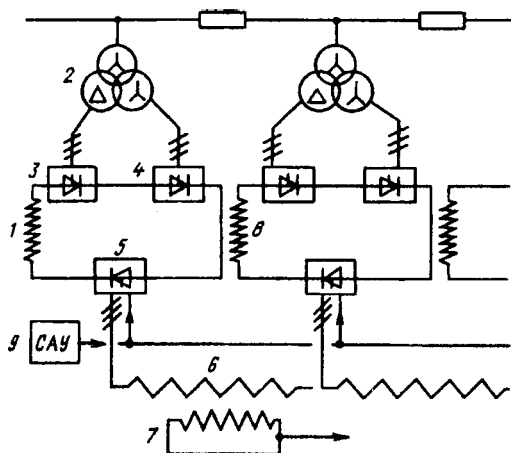


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема разгонного комплекса: 1 — СП накопитель энергии; 2 — трехобмоточный трансформатор; 3 — полупроводниковый выпрямитель; 4 — полупроводниковый инвертор; 5 — полупроводниковый преобразователь; 6 — якорь СП линейного двигателя; 7 — СП индуктор двигателя; 8 — второй участок; 9 — система автоматического управления

помещенных в криостаты. Система управления комплексом 9 работает от ЭВМ по специальной программе и осуществляет изменение частоты в обмотке якоря линейного двигателя и своевременное включение и отключение работающего участка в процессе движения.

Рассматриваемая схема (рис. 1) обладает универсальностью и может работать в следующих режимах:

1. **Режим накопления энергии.** Блоки 3, 4 и 5 работают в режиме выпрямителя. При увеличении тока энергии поступает из энергосистемы в накопитель.

2. **Режим хранения энергии.** Блок 3 работает в режиме выпрямителя, блок 4 в режиме инвертора, блок 5 в режиме выпрямителя. Ток все время остается неизменным.

3. **Режим выдачи энергии в энергосистему.** Блоки 3 и 4 работают в режиме инвертирования, блок 5 — в режиме выпрямителя. При уменьшении тока энергия возвращается в энергосистему.

4. **Режим разгона линейного двигателя.** Блок 3 работает в режиме выпрямителя, блок 4 в режиме инвертора, блок 5 переводится из режима выпрямителя в режим инвертора. При уменьшении тока энергия направляется в обмотку якоря линейного двигателя.

5. **Режим рекуперативного торможения линейного электродвигателя.** Блок 3 работает в режиме выпрямителя, блок 4 в режиме инвертора, блок 5 переводится в режим выпрямителя. Энергия поступает из обмотки якоря линейного двигателя, работающего при торможении в режиме генератора.

На рис. 2 приведена схема взаимного рас-

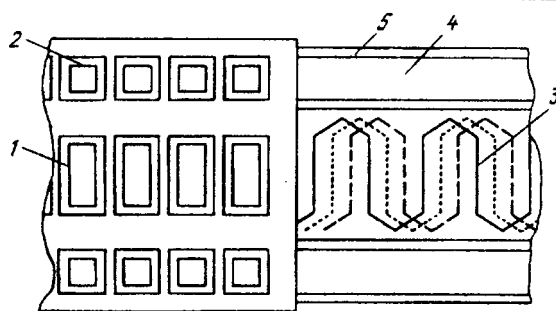


Рис. 2. Элементы линейного электродвигателя: 1 — СП обмотка индуктора линейного синхронного двигателя; 2 — СП обмотка системы магнитного подвеса; 3 — обмотка якоря ЛСД; 4 — проводящая полоса магнитного подвеса; 5 — путь для колес тележки

положения элементов системы движения стартового комплекса, в которой одновременно осуществляется электрическая тяга и электродинамическое подвешивание.

Неподвижная часть базируется на мощном бетонном фундаменте, вдоль которого располагается трехфазная многополюсная обмотка якоря 3. По обеим сторонам обмотки якоря находятся проводящие алюминиевые полосы 4.

Подвижная часть представляет собой колесную платформу, способную левитировать при увеличении скорости горизонтального движения. Многополюсный сверхпроводящий индуктор 1 линейного двигателя располагается вдоль оси платформы. Для магнитного подвешивания над проводящими полосами по краям платформы располагаются две многополюсные магнитные системы 2.

Конструктивная схема линейного синхронного электродвигателя представлена на рис. 3. Обмотка якоря 1 из медного транспонированного провода по своему исполнению аналогична многополюсной волновой обмотке гидрогенератора. Но в

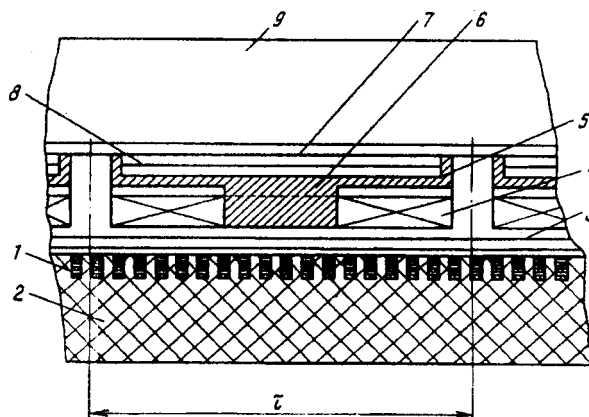


Рис. 3. Элементы линейного электродвигателя: 1 — обмотка якоря ЛСД; 2 — бетонное основание; 3 — проводящий экран; 4 — СП обмотка индуктора ЛСД; 5 — подвеска СП обмотки индуктора; 6 — каркас СП обмотки; 7 — крышка силового криостата; 8 — гелиевый криостат; 9 — корпус летательного аппарата

отличие от традиционной конструкции машины, в которой основой является шихтованный стальной магнитопровод, изолированные стержни обмотки якоря укладываются в пазы бетонного основания 2. Полюсная катушка обмотки индуктора 4 наматывается из сверхпроводника на каркас полюса 6 и с помощью подвески 5 соединяется с крышкой силового криостата 7. Гелиевый криостат 8 закрепляется на движущейся платформе, в верхней части которой располагается разгоняемый летательный аппарат 9. Для уменьшения воздействия высших гармонических составляющих магнитного поля на сверхпроводящую обмотку на внутренней стороне криостата устанавливается алюминиевый экран 3. Определение геометрических размеров и параметров каждого из основных элементов рассматриваемого комплекса является самостоятельной оптимизационной задачей, которая решается на основе существующих математических моделей. Для расчета сверхпроводящего электродвигателя использовалась методология, принятая в [5, 6]. Для расчета магнитного подвеса был использован опыт разработок [7]. Расчет сверхпроводящего индуктивного накопителя выполнялся на основе методик [8].

Соединение всех элементов комплекса в единое целое с наибольшим эффектом требует изучения основных особенностей электромеханических процессов, происходящих в схеме рис. 1. Характер процессов определяется также способом управления синхронным электродвигателем. В данном случае система управления двигателя 9 (рис. 1) при изменении частоты напряжения поддерживает угол χ постоянным, для чего имеется специальный датчик положения. Выбор схемы управления определяется основным требованием к электроприводу стартового комплекса, который должен обеспечить необходимое тяговое усилие.

Математическая модель для расчета линейного двигателя, питающегося от накопителя энергии. Для составления математической модели рассматриваемой системы запишем уравнения синхронного сверхпроводящего двигателя при переходном процессе.

Токи в трехфазной обмотке представляют гармоническую систему, связанную с частотой выражениями:

$$i_A = I_m \sin(\omega t); \quad (1)$$

$$i_B = I_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (2)$$

$$i_C = I_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right). \quad (3)$$

Напряжение фазы обмотки якоря определя-

ется согласно уравнениям:

$$u_A = \frac{d\Psi_A}{dt} + i_A r_a; \quad (4)$$

$$u_B = \frac{d\Psi_B}{dt} + i_B r_a; \quad (5)$$

$$u_C = \frac{d\Psi_C}{dt} + i_C r_a, \quad (6)$$

где r_a — сопротивление фазы якоря; $\Psi_{A,B,C}$ — потокосцепление с фазами A, B или C обмотки якоря.

Напряжение обмотки индуктора

$$u_f = r_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt}, \quad (7)$$

где r_f — сопротивление обмотки индуктора; i_f — ток обмотки индуктора; Ψ_f — потокосцепление с обмоткой индуктора.

Уравнение напряжения для демпферного контура индуктора

$$0 = r_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt}, \quad (8)$$

где r_D — сопротивление демпфера; i_D — ток демпферного контура; Ψ_D — потокосцепление с демпфером.

Потокосцепления:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_A i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Af} i_f + L_{AD} i_D; \\ \Psi_B &= L_B i_B + L_{BA} i_A + L_{BC} i_C + L_{Bf} i_f + L_{BD} i_D; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Psi_C &= L_C i_C + L_{AB} i_B + L_{CB} i_C + L_{Cf} i_f + L_{CD} i_D; \\ \Psi_f &= L_{Af} i_A + L_{Bf} i_B + L_{Cf} i_C + L_f i_f + L_{Df} i_D. \end{aligned} \quad (10)$$

В синхронном линейном двигателе со сверхпроводниковым индуктором

$$L_A = L_B = L_C; \quad L_{AB} = L_{AC} = L_{BC} = M_{AB};$$

$$L_{AD} = L_{BD} = L_{CD} = M_D.$$

Взаимоиндуктивности фаз якорной обмотки и индуктора при движении ротора изменяются со временем по гармоническому закону. Для фазы A

$$L_{Af} = M_{fm} \sin(\omega t - \chi). \quad (11)$$

Определим производную по времени потокосцепления с фазой A (9):

$$\frac{d\Psi_A}{dt} = L_A \frac{di_A}{dt} + M_{AB} \frac{di_B}{dt} + M_{AB} \frac{di_C}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{Af} i_f) + M_D \frac{di_D}{dt}. \quad (12)$$

Первый член правой части (12) после дифференцирования принимает вид

$$L_A \frac{di_A}{dt} = L_A \frac{dI_m}{dt} \sin \omega t + L_A I_m \frac{d}{dt}(\omega t) \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (13)$$

Примем ряд упрощающих допущений, общепринятых при рассмотрении переходных процессов в системах с электрическими машинами. Будем считать, что ток двигателя имеет только первую гармоническую составляющую. Предполагается, что на интервале времени, равном периоду колебаний, частота ω не успевает измениться, так что

$$\frac{d}{dt}(\omega t) = \omega. \quad (14)$$

Производная dI_m/dt характеризует скорость изменения максимального тока якоря во времени; порядок значения производной совпадает с порядком значения скорости вывода тока из накопителя. При использовании накопителей с большой индуктивностью эта скорость оказывается чрезвычайно малой по сравнению с величиной ωI_m , поскольку время вывода энергии из накопителя существенно превышает период колебаний тока якоря. Принимая во внимание это обстоятельство, а также выражение (14), можно представить (13) в виде

$$L_A \frac{di_A}{dt} = I_m L_A \omega \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (15)$$

Аналогично запишем второе и третье слагаемые правой части уравнения (14), которые в сумме с первым дадут выражение

$$u_{\Sigma 1,2,3} = I_m \omega L_A \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + I_m \omega M_{AB} \times \\ \times \left[\sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (16)$$

Принимая во внимание, что коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции обмотки якоря сверхпроводникового синхронного двигателя связаны соотношениями $M_{AB} = M_{AC} = -L_A/2$ [5], получаем выражение индуктивного падения напряжения в обмотке якоря (на сопротивлении ωL_A):

$$u_{\Sigma 1,2,3} = \frac{3}{2} I_m \omega L_A \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = I_m \omega L_a \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (17)$$

Четвертый член правой части (12) представляет собой ЭДС, наводимую в обмотке якоря движущейся над ней обмоткой индуктора:

$$\frac{d(L_A i_f)}{dt} = \frac{d}{dt} [i_f M_{fm} \sin(\omega t - \chi)] = M_{fm} \frac{di_f}{dt} \sin(\omega t - \chi) + \\ + \omega M_{fm} i_f \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \chi \right). \quad (18)$$

Здесь через χ обозначен угол между направлениями магнитного потока индуктора и максимальным магнитным потоком бегущего поля якоря. В момент, когда ток фазы A якоря достигает минимума, центр полюса ротора, создающего поток, параллельный потоку, создан-

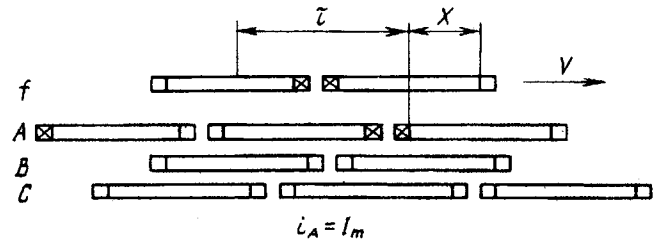


Рис. 4. Относительное расположение индуктора и фаз обмотки якоря

ному катушечной группой фазы A , отстоит от центра этой группы на расстоянии $x = \chi \frac{\tau}{\pi}$, где τ — полюсное расстояние (см. рис. 4).

В (10) для Ψ_f сумма первых трех слагаемых представляет собой величину, не зависящую от времени, если положение индуктора относительно ускоряющего поля (угол χ) поддерживается постоянным с помощью системы регулирования.

Таким образом, производную $\frac{d\Psi_f}{dt}$ можно представить в виде $\frac{d\Psi_f}{dt} = \frac{d}{dt}(L_f i_f)$.

Из (7) для короткозамкнутой сверхпроводниковой обмотки ($r_f = 0$ и $u_f = 0$) следует, что

$$\frac{d\Psi_f}{dt} = 0, \quad L_f i_f = \text{const}, \quad i_f = \text{const}. \quad (19)$$

Это приводит к упрощению выражения (18):

$$\frac{d(M_f i_f)}{dt} = \omega M_{fm} i_f \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \chi \right). \quad (20)$$

Пятое слагаемое правой части (12), связанное с демпферными токами, не учитываем. Справедливость этого допущения будет оценена в дальнейшем, при разработке конструкции демпфера.

Таким образом, напряжение на стороне переменного тока фазы обмотки определяется выражением

$$u_A = I_m \omega L_A \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + \omega M_{fm} i_f \times \\ \times \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \chi \right) + r_a I_m \sin \omega t. \quad (21)$$

Действующее значение напряжения фазы

$$U = \sqrt{(E \sin \chi + I_A r_a)^2 + (E \cos \chi + I_A \omega L_A)^2}, \quad (22)$$

где I_A и E — действующие значения тока и ЭДС линейного двигателя;

$$E = \omega M_{fm} i_f / \sqrt{2} \equiv \omega N L_{Af} i_f / \sqrt{2}. \quad (23)$$

Здесь через L_{Af} обозначена взаимная индуктивность между полюсом индуктора и одной катушкой якоря; N — число полюсов индуктора.

Баланс активной и реактивной мощности. Линейный двигатель получает от источника питания активную мощность P , которая превращается в

механическую энергию

$$P_{\text{мех}} = 3EI_a \sin \chi = \frac{3}{\sqrt{2}} N \omega i_f L_{af} I_a \sin \chi \quad (24)$$

и компенсирует активные потери энергии в цепи якоря

$$P = 3UI_a \cos \varphi = P_{\text{мех}} + 3I_a^2 r_a. \quad (25)$$

При работе линейного двигателя должен также выполняться баланс реактивной мощности

$$Q = 3UI_a \sin \varphi = 3EI_a \cos \chi + 3I_a^2 \omega L_a. \quad (26)$$

Если $Q > 0$, то двигатель работает в режиме отстающего тока и поглощает реактивную мощность, выработанную источником питания. В случае $Q < 0$ двигатель вырабатывает реактивную мощность и работает в режиме опережающего тока. При работе с инвертором тока, что имеет место в рассматриваемой нами схеме, двигатель может работать только при опережающем токе [9], поскольку инвертор поглощает реактивную мощность. Это означает, что $\cos \chi < 0$ и угол χ лежит в интервале $\frac{\pi}{2} < \chi < \frac{3}{2}\pi$. Диапазон значений угла $\frac{\pi}{2} < \chi < \pi$ отвечает работе в режиме двигателя (ускорение ротора), а диапазон $\pi < \chi < \frac{3}{2}\pi$ — работе в режиме генератора (торможение).

Уравнение движения ротора. Сила электромагнитного воздействия между обмотками ротора и статора определяется выражением

$$F = \frac{3\pi N}{\sqrt{2} \tau} [\Psi \times I_a], \quad (27)$$

где N — число полюсов ротора; Ψ — результирующее потокоцепление с обмоткой якоря.

Поскольку векторное произведение $[\Psi_a \times I_a] = 0$ (собственное поле не может действовать на якорь), выражение (27) можно представить в виде

$$F = \frac{3\pi N}{\sqrt{2} \tau} \Psi_f I_a \sin \chi. \quad (28)$$

Выразив потокоцепление полюса ротора с обмоткой якоря Ψ_f через индуктивность L_{af} и ток в обмотке возбуждения i_f , получим выражение для силы:

$$F = \frac{3\pi N}{\sqrt{2} \tau} i_f L_{af} I_a \sin \chi. \quad (29)$$

Уравнение механического движения системы

$$M \left(\frac{dv}{dt} \right) = F - F_c(v), \quad (30)$$

где v — скорость движения; $F_c(v)$ — сила сопротивления, включающая трение, аэродинамическое сопротивление и индукционное сопротив-

ление магнитного подвеса; M — суммарная масса тележки и летательного аппарата.

Работа инвертора. При рассмотрении процесса коммутации будем считать, что напряжение, вычисленное по (22), соответствует действующему напряжению, не искаженному коммутационным процессом.

Внешняя характеристика инвертора

$$U_d = -\frac{3\sqrt{6}}{\pi} U \cos \beta - \frac{3}{\pi} \omega L_a I_n, \quad (31)$$

где U_d — среднее значение выпрямленного напряжения; индуктивность обмотки якоря L_a определяет коммутационное сопротивление.

Угол коммутации γ определяется из уравнения [9]:

$$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{2I_n \omega L_a}{\sqrt{6} U}, \quad (32)$$

где I_n — ток накопителя; ток в обмотке якоря для мостовой схемы выпрямления связан с током накопителя:

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{3}} I_n. \quad (33)$$

Выражение (31) с учетом (32) можно представить в виде

$$U_d = -\frac{3\sqrt{6}}{\pi} U \frac{\cos(\beta - \gamma) + \cos \beta}{2}. \quad (34)$$

Угол регулирования β связан с положением ротора χ и определяет сдвиг по фазе между током и напряжением φ . Чтобы определить эту связь количественно, воспользуемся уравнением баланса активной мощности:

$$\begin{aligned} U_d I_n &= 3UI_a \cos \varphi = 3EI_a \sin \chi + r_a I_a^2 = \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U I_n \cos \beta + \frac{3}{\pi} \omega L_a I_n^2. \end{aligned} \quad (35)$$

Уравнение (35) позволяет установить связь между углами φ , β и χ :

$$\cos \beta = \frac{1}{U} \left[\frac{\pi}{3} (E \sin \chi + I_a r_a) - \frac{1}{2} \omega L_a I_a \right]; \quad (36)$$

$$\gamma = \beta - \arccos \left(\frac{1}{U} \left[\frac{\pi}{3} (E \sin \chi + I_a r_a) + \frac{1}{2} \omega L_a I_a \right] \right). \quad (37)$$

Следует заметить, что все приведенные выше формулы справедливы лишь при значениях угла γ , меньших $\pi/3$, при которых процесс коммутации протекает нормально.

Синхронный двигатель с позиционным управлением характеризуется заданным углом регулирования β . Частота ω определяется из условия синхронного движения через скорость v : $\omega = \pi v / \tau$. Угол χ определяется по углу β согласно (36):

$$\sin \chi = \frac{1}{E} \left(\frac{3}{\pi} \left(U \cos \beta + \frac{1}{2} \omega L_a I_a \right) - I_a r_a \right). \quad (38)$$

Вывод энергии из накопителя. Изменение со временем тока накопителя описывается уравнением

$$L \frac{dI_n}{dt} = - \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U \cos \beta - \frac{3}{\pi} I_n \omega L_a. \quad (39)$$

Особенность сверхпроводникового накопителя энергии как источника питания состоит в том, что вывод энергии сопровождается уменьшением тока в накопителе. Это ведет, в свою очередь, к уменьшению электромагнитной силы, движущей ротор. В то же время с энергетической точки зрения вывод энергии из накопителя должен быть по возможности наиболее полным. Поэтому требуется поиск оптимального значения минимального тока накопителя.

Движение ротора над двумя участками якоря, питающимися от различных накопителей. Как показано на рис. 1, электрическая схема состоит из нескольких участков, расположенных вдоль пути движения экипажа. При этом длина экипажа (ротора двигателя) оказывается сравнимой с длиной участка. Ротор может находиться или над одним участком, или над двумя участками одновременно. Во время ухода ротора с первого участка ток якоря на этом участке уже невелик, зато передние полюса ротора оказываются уже над вторым участком с большим значением тока. Сила, действующая на ротор,

$$F = \frac{3\pi N_1}{\sqrt{2}\tau} i_f L_{af} I_{a1} \sin \chi_1 + \frac{3\pi N_2}{\sqrt{2}\tau} i_f L_{af} I_{a2} \sin \chi_2. \quad (40)$$

Здесь индекс 1 обозначает участок, с которого ротор съезжает; индекс 2 — участок, на который он наезжает. Если весь ротор находится над одним участком, то $N_2=0$, при этом уравнение (30) остается в силе, а уравнения (31)–(38) записываются для всех участков, над которыми движется ротор; углы χ , γ , φ и ток накопителя I_n — разные для разных участков. В дальнейшем мы рассматриваем случай, когда все участки одинаковы и питаются от одинаковых накопителей.

Движение при переходе с участка на участок оказывается особенно сложным с точки зрения работы коммутатора. С уменьшением числа полюсов ротора, индуктивно связанных с данным участком якоря, падает ЭДС (23), так как уменьшается N . Это приводит к росту угла коммутации γ , который может превысить $\pi/3$. При составлении программы расчета считалось, что как только угол γ для одного из участков якоря превысит критическое значение $\pi/3$, на ротор перестает действовать сила со стороны этого участка якоря и ток накопителя этого участка пе-

рестает уменьшаться (энергия не выводится).

Торможение. После того как разгоняемый объект взлетит, необходимо быстро затормозить тележку, на которой размещается ротор двигателя. Для этого целесообразно использовать те же накопители, которые разрядились в процессе разгона. Переведя линейный двигатель в генераторный режим, можно зарядить накопители, рекуперируя им энергию механического движения. Для этого тиристорные преобразователи, стоящие на участке торможения, переводятся в режим выпрямления. При работе в режиме рекуперации угол χ между потокосцеплениями индуктора и якоря должен лежать в интервале $\pi < \chi < \frac{3}{2}\pi$. При решении задачи рассматривался выпрямительный режим без регулирования, т.е. принималось $\alpha=0$. В дальнейшем может оказаться целесообразным ввести регулирование, чтобы не допустить превышения тока накопителя над критическим значением. В режиме торможения закон изменения тока накопителя принимает вид

$$L \frac{dI_n}{dt} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U \cos \alpha - \frac{3}{\pi} I_n \omega L_a. \quad (41)$$

Уравнение баланса активной мощности — первые два неравенства (34) — остается в силе, но $\cos \varphi$ в данном случае меньше нуля, так как накопитель поглощает активную мощность:

$$-U_d I_n = 3E I_a \sin \chi + 3I_a^2 r_a. \quad (42)$$

Зависимость углов χ и α выражается формулой, аналогичной (38):

$$\sin \chi = - \frac{1}{E} \left(\frac{3}{\pi} \left(U \cos \alpha - \frac{1}{2} \omega L_a I_a \right) + I_a r_a \right). \quad (43)$$

Уравнение движения [форм. (30), (40)] остается в силе, но в случае необходимости следует учитывать уменьшение массы M объекта к началу торможения.

Рассмотрена задача разгона тележки массой 2000 т с ускорением около 30 м/с² до скорости около 300 м/с. Предполагалось, что после взлета разгоняемого объекта масса тележки уменьшится до 750 т. Рассмотрен также процесс торможения пустой тележки.

Параметры двигателя. Индуктор, расположенный на тележке, состоит из двадцати полюсных сверхпроводниковых катушек прямоугольной формы со сглаженными углами. Длина индуктора составляет 70 м. Размеры катушки приведены на рис. 5. Она имеет 600 витков с током 5000 А. Средняя плотность тока $j=2 \cdot 10^7$ А/м², высота катушки 0,15 м.

Якорь представляет собой трехфазную обмотку, намотанную с шагом 3,5 м. Полная длина якоря составляет более 2 км, из них 1700 м —

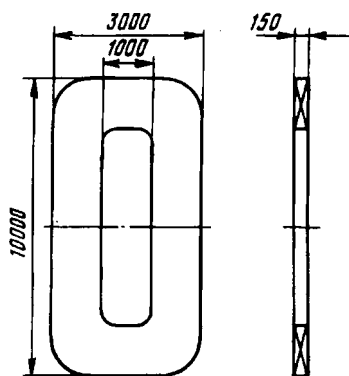


Рис. 5. Катушка индуктора

область разгона, около 500 м — область торможения. Якорь разбит на участки, имеющие самостоятельные электрические схемы и отдельные накопители. На каждую фазу каждого участка приходится шесть витков, уложенных в пазы шириной 100 мм; расстояние между пазами 95 мм. Обмотка якоря — волновая, однослойная; высота слоя 40 мм. Шесть витков каждой фазы образуют шесть независимых параллельных ветвей, каждая из которых содержит свой накопитель и инвертор-выпрямитель. Параллельная схема соединения позволяет снизить напряжение в обмотке двигателя, а также уменьшить индуктивное сопротивление якоря, а значит, и коммутационное сопротивление.

При расчете активного сопротивления полагалось, что сечение витка обмотки якоря составляет 1000 мм^2 , удельное сопротивление алюминиевого проводника $\rho = 2,82 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Индуктивность L_a трехфазной обмотки якоря рассчитывалась по методикам, предложенным в [5].

Взаимная индуктивность полюсной катушки индуктора и витка обмотки якоря оценивалась как взаимная индуктивность двух прямоугольных контуров с параллельными сторонами [10]. Расстояние между центральными плоскостями катушек индуктора и якоря по вертикали принято равным 0,45 м.

Для приведенного ниже расчета приняты следующие параметры: число участков обмотки, на которых происходит разгон, равно 10; число полюсов статора на участок обмотки равно 50; длина участка 175 м; взаимная индуктивность полюсной катушки индуктора и витка обмотки якоря $L_{af} = 4,58 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$; индуктивность одной ветви одного участка обмотки якоря $L_a = 9,41 \times 10^{-4} \text{ Гн}$; активное сопротивление одной ветви одного участка обмотки якоря $r_a = 0,0311 \text{ Ом}$.

Параметры накопителя энергии: ток 25000 А; индуктивность 6 Гн; полное число накопителей — 6 ветвей \times 10 участков = 60; энергия, запасенная в одном накопителе, $1,875 \cdot 10^9 \text{ Дж}$; полная за-

пасенная энергия $1,125 \cdot 10^{11} \text{ Дж}$.

Сила сопротивления $F_c(v)$. Аэродинамическое сопротивление рассчитывалось по [11]:

$$X_{\text{тр}} = C_x \frac{\rho v^2}{2} S. \quad (44)$$

Средняя площадь сечения крыльев принята равной 250 м^2 , плотность воздуха $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент сопротивления C_x , зависящий от скорости, определяется в соответствии с графиком, приведенным в [11].

Сила сопротивления, связанная с левитацией. Для ее оценки необходимо задать принципиальную конструкцию подвешивающего устройства. В основу принятой конструкции положено взаимодействие магнитного поля дополнительных сверхпроводниковых катушек с пассивными путевыми контурами (алюминиевыми листами), расположенными по обеим сторонам путевого полотна. Все расчеты проводились в соответствии с методикой, предложенной в [7].

Для алюминиевого листа с удельной плотностью $\rho = 2,82 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ глубина скин-слоя δ при скорости 300 м/с составляет 1,1 см; при скорости, с которой предположительно начинается магнитное подвешивание (30 м/с), значение $\delta = 3,65 \text{ см}$. Видимо, целесообразно использовать лист толщины, близкой к δ . Будем полагать, что сверхпроводниковые катушки для левитации расположены вдоль полотна с шагом $\tau = 3,5 \text{ м}$ (см. рис. 2). «Волновое число» $k = 2\pi/\lambda = 2\pi/2\tau = 0,9 \text{ м}^{-1}$. Таким образом, на всем диапазоне движения выполнено условие высоких скоростей, сформулированное в [7]: $k\delta \ll 1$. При этом условии можно оценить левитационную F_L и тормозящую F_D силы, приходящиеся на единицу площади листа, по формулам:

$$F_L = \frac{F_\infty}{1 + k\delta}; \quad (45)$$

$$F_D = \frac{k\delta}{1 + k\delta} F_\infty. \quad (46)$$

Значение F_∞ оценивалось по формуле

$$F_\infty = \frac{2B_0^2 \exp(-2kh)}{\mu_0}, \quad (47)$$

где B_0 — максимальное значение индукции в центральной плоскости левитирующих сверхпроводниковых катушек; h — расстояние от катушек до алюминиевого листа. Согласно (45) и (46), тормозящая сила в $k\delta$ раз меньше левитационной. Таким образом,

$$F_D = F_L \frac{\pi}{\tau} \sqrt{\frac{2\rho\tau}{\pi\mu_0 v}}. \quad (48)$$

Левитационная сила при рассматриваемых на-
м больших скоростях практически не зависит
от скорости и должна быть равна силе тяжести
экипажа $F_L = 2 \cdot 10^7$ Н. Оценка показывает, что
при площади алюминиевого листа 70×10 м²
(две алюминиевые полосы шириной каждая 5 м
по обе стороны от индуктора длиной 70 м)
такую силу могут обеспечить 40 прямоугольных
катушек (5 м поперек полосы, 3 м вдоль полосы,
70 мм высотой) — см. рис. 2. Число витков
каждой катушки 260 при токе 5000 А. Средняя
плотность тока равна $2 \cdot 10^7$ А/м². Сила тор-
можения из-за левитации при больших скоростях
($v > 30$ м/с) оценивалась по формуле (48).

При более тщательной разработке конструк-
ции, видимо, будет использована более эконо-
мичная нуль-поточная схема магнитного подвеса.
Однако сила сопротивления движению из-за из-
менения конструкции не должна существенно из-
мениться.

При движении со скоростями $v < 30$ м/с сила
сопротивления оценивалась как обычная сила
трения колес тележки с коэффициентом 0,1.

Переход к безразмерным единицам. За базовые
единицы были приняты:

минимальный ток накопителя $I_{баз} = 25000$ А
скорость движения $v_{баз} = 300$ м/с
мощность $P_{баз} = F_{ср} v_{баз} = 6 \cdot 10^7$ Н \times 300 м/с =
 $= 1,8 \cdot 10^{10}$ Вт

напряжение $U_{баз} = \frac{P_{баз}}{I_{баз}} = 7,2 \cdot 10^5$ В = 720 кВ

сопротивление $Z_{баз} = \frac{P_{баз}}{I_{баз}^2} = 28,8$ Ом

круговая частота $\omega_{баз} = \pi v_{баз} / \tau = 270$ с⁻¹

постоянная инерции при разгоне $T_j =$
 $= \frac{M v_{баз}}{F_{ср}} = 10$ с

постоянная инерции при торможении 3,75 с.

Основные уравнения, используемые в задаче,
приобретают следующий вид. Уравнение движе-
ния (30) с учетом (29)

$$T_j \frac{dv^*}{dt} = \frac{3}{\sqrt{2}} N I_a^* i_f^* x_{af}^* - F_c^* (v^*), \quad (49)$$

где $x_{af}^* = \omega_{баз} L_{af} / Z_{баз}$; $F_c^* = F_c / F_{ср}$.

Уравнение для напряжения U (22)

$$U^* = \sqrt{(E^* \sin \chi + I_a^* r_a^*)^2 + (E^* \cos \chi + I_a^* \omega^* x_a^*)^2}, \quad (50)$$

где согласно (23)

$$E^* = \frac{E}{U_{баз}} = \frac{1}{\sqrt{2}} N i_f^* \omega^* x_{af}^*. \quad (51)$$

Уравнение для тока накопителя (39) при-
обретает вид

$$\frac{dI_n^*}{dt} = -\frac{3\sqrt{6}}{\pi} U^* \frac{Z_{баз}}{L} \cos \beta - \frac{3}{\pi} I_n^* \omega^* x_a^* \frac{Z_{баз}}{L}. \quad (52)$$

Уравнения для определения углов χ и γ (36),
(37), (38), (43) остаются прежними, только вме-
сто абсолютных единиц физических величин надо
использовать относительные.

Решение задачи. Необходимо решить системы
нелинейных дифференциальных уравнений (30)
и (39), описывающих изменение во времени
скорости ротора и скорости вывода тока из на-
копителя. Для численного решения этих урав-
нений использовалась схема Рунге—Кутта, по-
зволяющая определить поведение системы к мо-
менту времени $t_{n+1} = t_n + \Delta t$, если в момент t_n
все ее параметры заданы. Программа составлена
согласно схеме Рунге—Кутта четвертого порядка
(см., например, [12]). Для расчета принят шаг
 $\Delta t = 0,03$ с. Исследование показало, что умень-
шение шага до 0,01 с существенно не изменяет
результатов расчета.

В начале каждого шага определялось: сколько
полюсов ротора находится над каждым из ра-
ботающих участков якоря? Затем рассчитывались
приращения скорости объекта и тока накопителя
на каждом участке согласно схеме Рунге—Кутта
в соответствии с уравнениями (30) и (39). На
каждом промежуточном шаге схемы определя-
лись значения углов β и γ по заданному значению
угла χ согласно формулам (36) и (37). Углы
 β и γ определялись для каждого участка. На
участке торможения угол регулирования α принят
равным нулю; угол χ (43) рассчитываются ите-
рациями; значение напряжения U (22) уточня-
лось на каждом шаге. Итерации сходятся до-
статочно быстро: увеличение числа шагов с 5
до 20 не изменяет результатов расчета.

Участки с 11 по 14 «работают» в генераторном
режиме. После того, как объект целиком ока-
зывается над 11-м участком, его масса скачком
уменьшается с 2000 до 750 т.

Расчет начинается с задания параметров си-
стемы в начальный момент времени. При до-
статочно больших скоростях движения, для ко-
торых частота колебаний тока и напряжения яко-
ря не изменяется существенно на протяжении
периода колебаний, выполняется неравенство.

$$\omega \gg \frac{d\omega}{dt} T = \frac{\pi dv}{\tau dt} T = \frac{\pi F}{\tau M} T, \quad (53)$$

иначе

$$v^2 \gg \frac{2F\tau}{M}. \quad (54)$$

Это условие выполняется при скоростях, су-
щественно превышающих 14 м/с. Программа
составлена таким образом, что позволяет рассмат-
ривать движение с любой начальной скоростью.

В начальный момент на индуктор действует
сила F , вызывающая заданное ускорение. Под
действием этой силы индуктор приобретает ско-

рость v_0 , достаточную для работы системы управления запуском. Как показывает расчет, характер дальнейшего движения мало зависит от выбора скорости v_0 , если ее значение не ниже 2 м/с. Приведенные ниже результаты получены при $v_0 = 6$ м/с.

Результаты численного эксперимента. Переходный процесс в сложной системе, содержащей накопителя энергии, статические преобразователи и линейный синхронный электродвигатель, определяется численным решением задачи на разработанной математической модели. Сопоставление результатов численного эксперимента дает возможность оценить технические решения, выявить основные энергетические соотношения в схеме и получить рекомендации по перспективе применения и проектирования опытной установки. Важнейшим показателем движения рассматриваемого электрохимического комплекса является линейная скорость, изменение которой (и пропорциональной ей частоты тока f) во времени показано на рис. 6, из которого видно, что нарастание скорости тележки до базового значения происходит практически равномерно в течение 10 с. Далее в течение 3 с происходит рекуперативное торможение и остановка тележки.

На рис. 7 показано изменение тока во времени в течение всего процесса. Процесс начинается с разряда индуктивного накопителя энергии на первом участке пути. Через 2,3 с значение тока в накопителе уменьшается до $0,55I_N$. В этот момент тележка наезжает на второй участок, который автоматически подключается ко второму накопителю энергии. Короткий период времени (от 2,3 до 2,5 с) одновременно работают первый и второй накопители. При этом ток в первом накопителе снижается до минимального значения $0,48I_N$ и отключается. Через 4 с включается третий участок пути, на котором продолжается разгон. В дальнейшем наблюдаем аналогичный процесс разряда тока при переходе с участка на участок. Следует отметить, что начиная со второго участка уровень падения тока составляет $0,38I_N$, что свидетельствует о высоком коэффи-

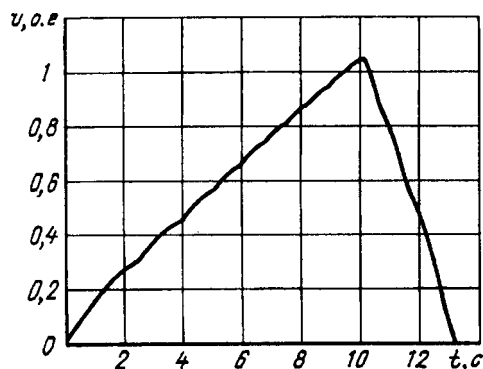


Рис. 6. Скорость объекта как функция времени $v_{\text{баз}} = 300$ м/с

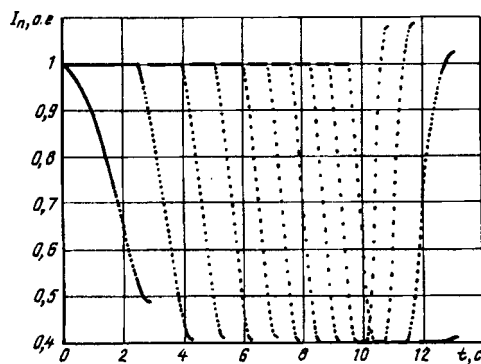


Рис. 7. Ток накопителей отдельных участков как функция времени, $I_{\text{баз}} = 25000$ А

циенте использования энергии накопителя. Через 10 с после начала процесса произойдет взлет, на следующем участке пути двигатель переходит в генераторный режим. В результате накопители начинают заряжаться. Видим, как ток в накопителе увеличивается, и через 11 с достигает значения $1,08I_N$. Этот процесс завершается полной остановкой тележки примерно через 13 с после начала движения.

Цикличность изменения тока в процессе разгона приводит к необычной картине изменения механической силы во времени, которую мы наблюдаем на рис. 8. Действующая на тележку сила возрастает до значения $1,3F_N$ и затем снижается до $0,7F_N$. При этом среднее значение движущей силы остается на уровне F_N на протяжении всех участков разгона. После взлета происходит дискретное изменение направления движущей силы на обратное.

На рис. 9 показано изменение углов во времени. Угол $(\pi - \chi)$ устанавливается на уровне 55° и на участке разгона поддерживается постоянным. Значение угла $(\pi - \chi)$ обеспечивает максимальную силу при заданных параметрах системы. Угол регулирования β обеспечивает требуемое значение угла χ . Из рис. 9 можно также оценить характер коммутационного процесса в инверторно-выпрямительной схеме — изменение угла коммутации γ на всем протяжении пути. При включении

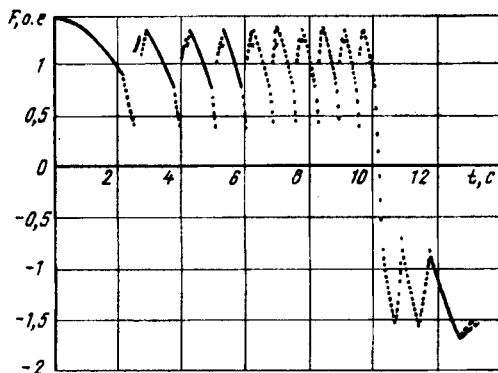


Рис. 8. Зависимость силы от времени, $F_{\text{баз}} = 6 \cdot 10^7$ Н

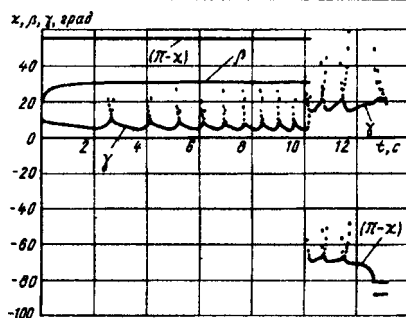


Рис. 9. Зависимость углов регулирования и коммутации от времени

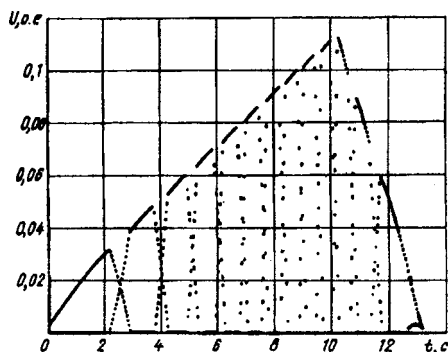


Рис. 10. Зависимость действующего значения напряжения на зажимах двигателя от времени $U_{\text{баз}} = 720 \text{ кВ}$

участка максимальное значение угла коммутации достигает 20° . При увеличении ЭДС угол коммутации уменьшается. В выпрямительном режиме при увеличении тока значение угла коммутации достигает 30° .

На рис. 10 показано изменение напряжения на зажимах обмотки якоря линейного двигателя: нарастание на разгонном участке и затухание на участке торможения. Исследование процесса изменения напряжения позволяет выбрать конструкцию изоляции обмотки якоря. Особое внимание следует обратить на изоляцию обмоток последних участков разгона.

Зависимость пройденного расстояния от времени показана на рис. 11. Длина пути равноускоренного движения за 10 с составляет 1700 м. Далее происходит торможение и остановка тележки. Вся длина разгонного комплекса с учетом торможения и остановки тележки составляет 2200 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fair H, Meinel C, Park K. Electromagnetic launch highway to the stars. — IEE Transactions on magnetics, vol. 24, № 2, March 1988.
2. Baldi R.W., Johnson R.A., Kimmy E.R., Farmer J.F. General Dynamics large superconductivity magnets for government applications. Proc. 2-nd Annual Conf. Superconductivity & Applications, Apr. 1988.
3. Транспорт с магнитным подвесом. Под ред. В.И. Бочарова и В.Д. Нагорского. — М.: Машиностроение, 1991.
4. Atherton D.L., Eastham A.R. Canadian developments in superconducting Maglev and linear synchronous motors. — Cryogenics, July 1975.
5. Андрианов В.В., Веселовский А.С., Рубинраут А.М. Расчет и проектирование криогенных электрических машин. —

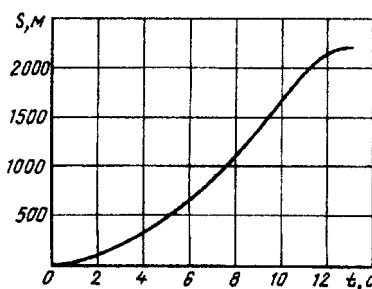


Рис. 11. Зависимость пути от времени

М.: МЭИ, 1988.

6. Косыкин Ю.П., Цейтлин Л.А. Синхронные машины с немагнитным ротором. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. Richards P.L., Tinkham M. Magnetic Suspension and Propulsion Systems for High-Speed Transportation — J. Appl. Phys. 43, 2680 (1972).
8. Andrianov V.V., Batenin V.M., Veselovsky A.S. An experimental 100 MJ SMES facility. 13 Int. Cryogenics Eng. Conf., April 1990.
9. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины. Синхронные машины. — М.: Высшая школа, 1990.
10. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
11. Федосьев В.И. Основы техники реактивного полета. — М.: Наука, 1981.
12. Каган Б.М., Тер-Микаэлян Т.М. Решение инженерных задач на автоматических цифровых вычислительных машинах. — М.: Госэнергоиздат, 1958.

[20.03.97]

А в т о р ы: **Рубинраут Александр Моисеевич** окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1956 г. В 1990 г. защитил докторскую диссертацию по проблемам создания сверхпроводниковых электрических машин. Ведущий научный сотрудник Отделения прикладной сверхпроводимости Объединенного института высоких температур Академии наук (ОИВТАН).

Бурбаева Нина Владимировна окончила физический факультет Московского государственного университета в 1972 г. В 1981 г. защитила кандидатскую диссертацию по проблеме поглощения электромагнитного излучения в сильно легированных полупроводниках. Научный сотрудник Отделения прикладной сверхпроводимости ОИВТАН.

Веселовский Андрей Серафимович окончил факультет приборостроения Московского высшего технического училища им. Н.Э. Баумана в 1960 г. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию по криогенным электрическим машинам. Заместитель директора Отделения прикладной сверхпроводимости ОИВТАН.

Зенкевич Владимир Борисович окончил факультет промышленной теплоэнергетики Московского энергетического института в 1959 г. В 1985 г. защитил докторскую диссертацию по физическим проблемам создания сверхпроводящих магнитных систем. Директор Отделения прикладной сверхпроводимости ОИВТАН.

Кирьенин Игорь Александрович окончил физико-механический факультет Ленинградского политехнического института в 1962 г. В 1973 г. защитил кандидатскую диссертацию по сверхпроводящим магнитным системам. Заведующий сектором Отделения прикладной сверхпроводимости ОИВТАН.

Методы анализа многофазных электрических машин

КАЛУЖСКИЙ Д.Л.

Рассматривается многофазная система, отличительная особенность которой состоит в том, что электрический угол между двумя соседними фазами в ней меняется от 90 до 180° при увеличении числа фаз. В отличие от общеизвестных, предложенная многофазная система более проста для анализа и позволяет создать универсальные алгоритмы построения обмоток переменного тока.

Ключевые слова: электрическая машина, многофазная система, конструкция обмоток, алгоритмы

Известно, что при построении прямого электропривода требования, предъявляемые к параметрам исполнительного двигателя, существенно возрастают. Главное требование — обеспечение необходимого момента на валу машины при наличии жестких ограничений по массе, габаритам и электрическим потерям — является причиной постоянного поиска более совершенных конструкций магнитопровода и схемных решений. Одно из таких направлений поиска базируется на использовании критерия Рейнольдса [1], требующего уменьшения длины электрических и магнитных контуров с одновременным увеличением их сечений. На практике применение критерия привело к появлению схем, более известных из теории машин с катящимся ротором, когда обмотка, которую в дальнейшем будем называть дискретно-распределенной (ДРО), выполняется из отдельных катушек, каждая из которых охватывает только один зубец [2, 3].

Сегодня двигатели с ДРО имеют самые высокие в мировой практике электромашиностроения удельный момент и энергетические показатели. Это обстоятельство вынуждает обращать самое серьезное внимание на все процессы преобразования энергии в электрических машинах такого типа, в том числе и на те, которые напрямую зависят от фазности дискретно-распределенных обмоток.

При работе от сети ДРО создает МДС, пространственное изменение которой вдоль воздушного зазора представляет собой в первом приближении кусочно-гладкую функцию с ограниченным числом точек разрыва. Дискретный характер МДС, в свою очередь, накладывает целый ряд особенностей на процессы энергопреобразования, и одна из них — зависимость выходных параметров от числа фаз m . Так, в индукторных двигателях реактивного типа с ДРО [4] простое

The paper considers a multi-phase system. The specific feature of the system is that the electric angle in it between adjacent phases changes from 90 to 180° with increasing a number of phases. In contrast to the well known systems the system considered is simpler for an analysis and makes it possible to create universal algorithms for constructing AC windings.

Key words: electrical machine, multi-phase system, winding construction, algorithms

увеличение числа фаз позволяет в условиях сильного насыщения стали магнитопровода повысить удельный момент на 15–20%. В синхронных двигателях с постоянными магнитами на роторе фазность ДРО определяет значения «пульсирующих» моментов. В асинхронных двигателях главный фактор, определяющий качество процессов энергопреобразования, — число фаз статорной и короткозамкнутой роторной обмоток.

Для детального исследования всех перечисленных явлений потребовалось разработать базовый алгоритм построения ДРО, по которому число фаз может принимать любые целые значения, большие двух. Поскольку все попытки решить эту задачу с помощью традиционных представлений об m -фазной системе, в которой характеристический угол между b_j и b_{j+1} ($j=1, 2, \dots, m-1$) векторами, принадлежащими комплексной плоскости, равен $2\pi/m$, закончились неудачей, предлагается m -фазная система с характеристическим углом

$$\delta = (m-1)\pi/m.$$

Подробно базовый алгоритм построения АРО изложен в [3]. Суть его состоит в следующем. Каждая фаза ДРО разбивается на несколько катушечных групп или p -фазных зон. Фазную зону образуют s согласно соединенных сосредоточенных катушек, расположенных на s соседних зубах магнитопровода. Порядок чередования фазных зон, принадлежащих различным фазам, вдоль поверхности статора определяется порядковым номером фазы. Например, если фазы обозначены как: a_1, a_2, \dots, a_m , то первые s пазов занимает фаза a_1 , вторые s пазов — фаза a_2 и т.д. По отношению к клеммам источника питания фазные зоны также могут включаться встречно и согласно. Если согласное включение фазной зоны обозначить как +1, а встречное

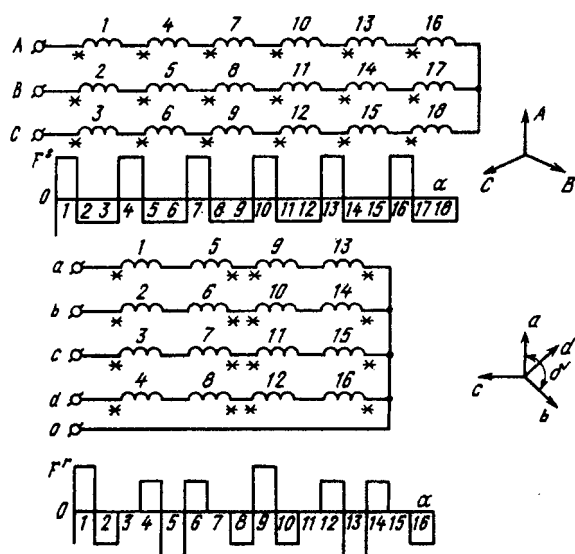


Рис. 1

как -1 , то для l -й фазной зоны ($l=1, 2, \dots, p$), принадлежащей a_n -й фазе ($n=1, 2, \dots, m$), вид соединения определяется формулами:

$(-1)^{n+1}$ — когда s — четное число;

$(-1)^{l+1}$ — когда s — нечетное, а m — четное число;

$+1$ — когда m и s — нечетные числа.

На рис. 1 показаны схемы соединения катушек в трехфазной ДРО статора и четырехфазной короткозамкнутой ДРО ротора асинхронной машины, выполненные в соответствии с вышеизложенным алгоритмом. Если ограничиться основными гармониками ряда Фурье, то ДРО можно рассматривать как совмещенную обмотку с одним комплектом выводов, образующую две встречно вращающиеся МДС:

$$F = F_m \cos \left(\omega t - \frac{z+p}{2} \alpha \right) + F_m \cos \left(\omega t + \frac{z-p}{2} \alpha \right), \quad (1)$$

где z — число пазов магнитопровода; α — угол вдоль поверхности статора.

В рассматриваемом варианте [5]

$$m_1=3; s_1=1; p_1=6; z_1=18; m_2=4; s_2=1;$$

$$p_2=4; z_2=16$$

обмотка статора образует основные гармоники МДС полюсности 6 и 12, обмотка ротора — 6 и 10, синхронная частота вращения равна $\omega/6$.

Иногда для выполнения специальных требований: ограничения процентного содержания «паразитных» моментов в синхронном двигателе, повышения момента в индукторной машине реактивного типа и т.д. необходимо выполнить статор с m_1 -фазной ДРО ($m_1 > 3$) при наличии трех- или двухфазного источника питания. В такой

ситуации можно воспользоваться следующим приемом.

1. Проектируется магнитопровод с m_1 -фазной ДРО, уложенной в z пазов, с числом витков в каждой катушке w . Характеристический угол между a_i и a_{i+1} фазами составляет $\delta_1 = (m_1 - 1)\pi/m_1$.

2. Рассчитываются числа витков в катушках фаз b_1, b_2, \dots, b_{m_2} , расположенных на зубцах, которые ранее занимала фаза a_j ($j=1, 2, \dots, m_1$):

$$w_{b1j} = \frac{2}{m_2} w |\cos [\delta_1 (j-1) - \gamma]|;$$

$$w_{b2j} = \frac{2}{m_2} w |\cos [\delta_1 (j-1) - \delta_2 - \gamma]|;$$

.....

$$w_{bm2j} = \frac{2}{m_2} w |\cos [\delta_1 (j-1) - \delta_2 (m_2 - 1) - \gamma]|. \quad (2)$$

Здесь m_2 — число фаз источника питания; γ — угол между фазами a_1 и b_1 ; порядок соединения катушек в каждой фазе b_i соответствует исходному схемному решению в m_i -фазной обмотке.

На рис. 2 показана конструкция эквивалентной пятифазной синхронной машины с постоянными магнитами ($2p=12$), предназначенная для работы от двухфазного источника питания; относительные значения чисел витков в катушках фаз b_1 и b_2 следующие:

Номер катушки	1,6	2,7	3,8	4,9	5,10
w_{b1j}	1,0	0,809	0,309	0,309	0,809
w_{b2j}	0	0,588	0,951	0,951	0,588

Если $m_2=3$, то на каждом зубце магнитопровода должно быть размещено по три катушки, принадлежащие фазам b_1, b_2, b_3 . При этом, чтобы упростить обмоточные работы, с каждого зубца убирается одна катушка с наименьшим числом

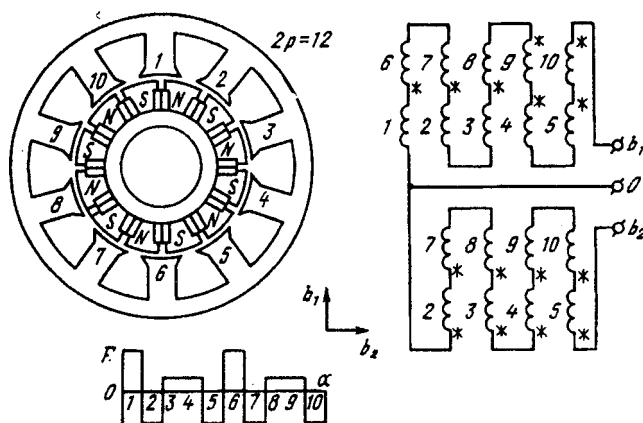


Рис. 2

витков. Соответственно числа витков оставшихся катушек, принадлежащих, например, фазам b_2 и b_3 , увеличиваются (уменьшаются) согласно

$$i_{b1} w_{b1j} = -(i_{b2} + i_{b3}) w_{b1j}. \quad (3)$$

Симметрия фаз (обычно с точностью 3—4%) достигается за счет варьирования угла γ .

Правомерность предложенного подхода к проектированию схем ДРО была многократно проверена и подтверждена результатами испытаний опытных и опытно-серийных образцов электродвигателей различного принципа действия. Для их дальнейшего исследования требовалось выяснить:

1. В какой мере существующие методы преобразования m -фазных систем, базирующиеся на положении, что характеристический угол $\delta = 2\pi/m$, пригодны для анализа систем с $\delta_1 = (m-1)\pi/m$?

2. В чем сходства и различия предложенной и общепринятой системы, проявляющиеся при построении m -фазных распределенных обмоток, а также при сравнении форм пространственных МДС, уравнений индуктивных параметров?

Необходимость постановки последних вопросов, несмотря на кажущееся отсутствие в них практического смысла (действительно, выполнение распределенных обмоток с числом фаз, отличным от двух или трех, маловероятно), имеет большое теоретическое значение, поскольку позволяет рассматривать различные типы электрических машин с единых позиций.

На рис. 3 и 4 схематично показаны разрезы электрических машин с однослойными распределенными обмотками, с целым шагом и числом пар полюсов $p=1$, выполненные при условии $\delta = 2\pi/m$ (левая часть рисунков) и $\delta_1 = (m-1)\pi/m$ (правая часть).

Если m — нечетное число, то формы пространственных МДС, несмотря на различие значений характеристических углов, идентичны и при увеличении m стремятся к синусоиде. Если m — четное и $\delta = 2\pi/m$, то независимо от способа размещения на магнитопроводе обмотки, уложенной в одни и те же пазы так, как это показано на рисунке, или в разные (при этом число пазов увеличивается в два раза), m -фазная обмотка всегда может быть рассмотрена как $m/2$ -фазная, поскольку для исходных переменных x_1, x_2, \dots, x_m справедливо: $x_i = x_{i+m/2}$ ($i=1, 2, \dots, m$).

Помимо изложенного существует и другое мнение, в соответствии с которым m -фазная система образуется из двух $m/2$ -фазных систем [6], сдвинутых относительно друг друга на фазовый угол π/m . Если такой подход распространить на все m -фазные системы (m — четное), то оказывается, что двухфазная обмотка при

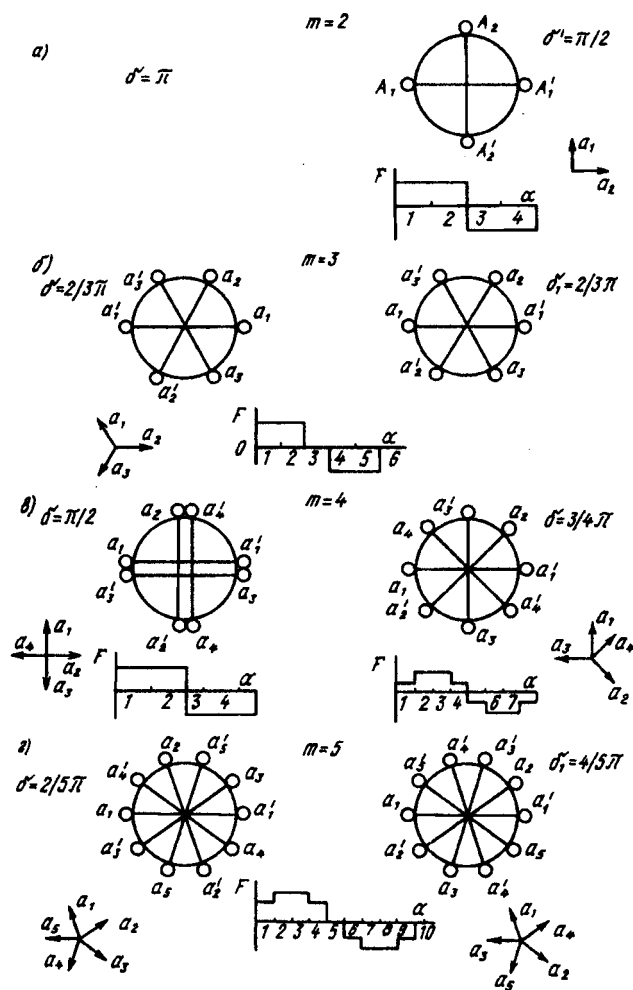


Рис. 3

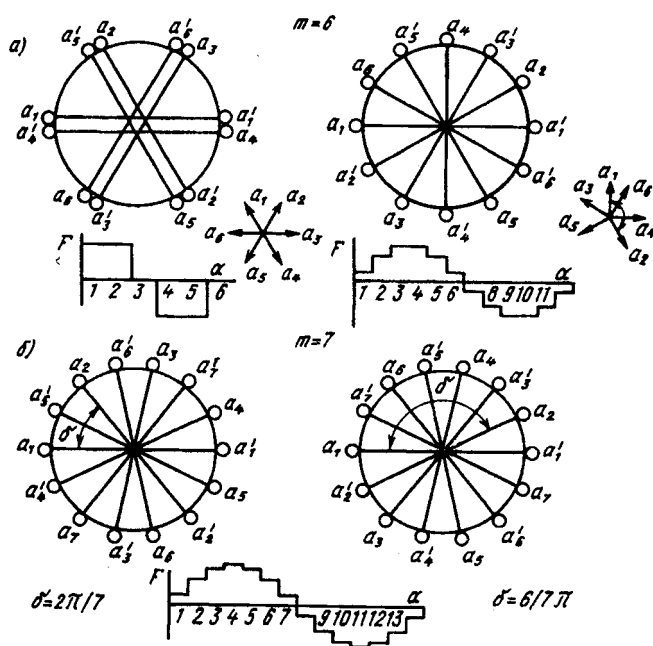


Рис. 4

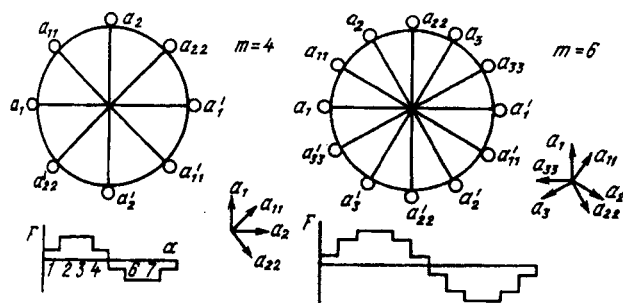


Рис. 5

$\delta = 2\pi/m$ создает вращающееся магнитное поле, а форма образованной ею МДС, как и формы МДС 4-, 6-фазных обмоток, идентичны (рис. 5) соответствующим формам МДС обмоток, построенных при условии $\delta_1 = (m-1)\pi/m$. Здесь следует отметить: анализ $m/2$ -фазных систем, смещенных на угол π/m , известными методами, например, методом симметричных составляющих, не представлен в литературе.

Обратим внимание на порядок построения распределенных обмоток. При значении характеристического угла $\delta_1 = (m-1)\pi/m$ для любого m первые q пазов магнитопровода (на рис. 3–5 $q=1$) занимает фаза a_1 , вторые q пазов (при движении против часовой стрелки) — фаза a_2 , третьи q пазов — фаза a_3 и т.д. Если $\delta = 2\pi/m$ и m — нечетное число, то при $m > 3$ порядок чередования фаз по пазам нарушается. Например, для пятифазной обмотки (рис. 3,2) первые q пазов занимает фаза a_1 , вторые q пазов — фаза a_3 , третьи q пазов — фаза a_5 ..., для семифазной обмотки (рис. 4) порядок чередования фаз по пазам — $a_1, a_4, a_7, a_3, a_6, a_2, a_5$. Если $\delta = 2\pi/m$ и m — четное (рис. 5), то при движении вдоль воздушного зазора порядок чередования фаз не нарушается и общая закономерность может быть представлена рядом: $a_1, a_{11}, a_2, a_{22}, a_3, a_{33} \dots$

Анализ рассмотренных выше примеров позволяет утверждать:

система многофазных обмоток с характеристическим углом δ_1 не противоречит существующим представлениям о многофазном преобразователе энергии;

предложенная система упрощает алгоритмы построения обмоток и соответствующее им программное обеспечение, поскольку для любого m порядок чередования фаз по пазам магнитопровода остается неизменным.

Посмотрим, в какой мере можно опираться на традиционные методы при исследовании многофазной системы с характеристическим углом δ_1 .

Преобразование, дающее симметричные составляющие

$$\|x\| = \|S\| \cdot \|x_s\|, \quad (4)$$

где

$$\|x_s\| = \text{colon} \{\dot{x}^{(0)}, \dot{x}^{(1)}, \dots, \dot{x}^{(m-1)}\}$$

— симметричные составляющие первоначальных переменных x . Матрица преобразования S с фазовым множителем $a = \exp(j\delta_1)$ и обратная ей матрица S^{-1} при $m=2k+1$ ($k=1, 2, 3, \dots$ — целое число) имеют общепринятый вид:

$$\|S\| = \frac{1}{\sqrt{m}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a^{-1} & \dots & a^{-(m-1)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & a^{-(m-1)} & \dots & a^{-(m-1)(m-1)} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\|S\|^{-1} = \frac{1}{\sqrt{m}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a & \dots & a^{(m-1)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & a^{(m-1)} & \dots & a^{(m-1)(m-1)} \end{bmatrix}; \quad (6)$$

причем для (4)–(6) соблюдаются условия:

$$\dot{x}^{(i)} = \dot{x}^{*(m-i)}, \quad (7)$$

где $i=1, 2, \dots, (m-1)/2$;

$$1 + a^l + a^{2l} + \dots + a^{l(m-1)} = 0, \quad (8)$$

где $l=1, 2, \dots, m-1$.

Пусть число фаз m — четное ($m=2k, k=1, 2, \dots$ — целое). Если сформировать матрицу Фортескью с рангом m по аналогии с (5), то такое преобразование не будет иметь логического смысла, поскольку окажется, что коэффициенты матрицы S^{-1} имеют значения модулей и представляют собой нетривиальные рекуррентные соотношения. Чтобы упростить математические выкладки и получить привычные выражения, выполнен следующий прием. Многофазная ($m=2k$) система при анализе ее методом симметричных составляющих искусственно преобразуется в $2m$ -фазную систему. С физической точки зрения это означает, что в электрической машине (правая часть рис. 3,а) каждая фаза разбивается на две полуфазы, включенные встречно (левая часть рис. 3,б). Для сохранения баланса мощностей необходимо:

$$u_{a1} = -u_{a3} = \frac{1}{\sqrt{2}} u_{A1}; \quad i_{a1} = -i_{a3} = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{A1}; \quad (9)$$

$$u_{a2} = -u_{a4} = \frac{1}{\sqrt{2}} u_{A2}; \quad i_{a2} = -i_{a4} = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{A2}. \quad (10)$$

По условию постоянства энергии, запасенной в контурах $A_1 A_1$ и $a_1 a_1, a_3 a_3$:

$$i_{A1} \Psi_{A1} = i_{a1} \Psi_{a1} + i_{a3} \Psi_{a3}, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned}\Psi_{a1} &= L_{a1a1} i_{a1} + L_{a1a3} i_{a3}; \\ \Psi_{a3} &= L_{a3a1} i_{a1} + L_{a3a3} i_{a3}.\end{aligned}\quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), получаем числа витков w и сечение провода S_n для контуров:

$$w_{a1} = w_{a3} = \frac{1}{\sqrt{2}} w_{A1}; \quad S_{na1} = S_{na3} = \frac{1}{\sqrt{2}} S_{nA}, \quad (13)$$

что подтверждает условие постоянства геометрических размеров машины и выделяемых электрических потерь.

Для эквивалентной $2m$ -фазной системы матрица Фортескью запишется как:

$$\|S\| = \frac{1}{\sqrt{2m}} \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a^{-1} & \dots & a^{-(2m-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & a^{-(2m-1)} & \dots & a^{-(2m-1)(2m-1)} \end{vmatrix}; \quad (14)$$

причем элементы, расположенные на $(m+1)$ -й строке и столбце равны $S_{i,m+1} = S_{m+1,i} = (-1)^i$, где $i=0, 1, 2, \dots, 2m-1$. Матрица (14) легко обращается:

$$\|S\|^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2m}} \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a & \dots & a^{(2m-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & a^{(2m-1)} & \dots & a^{(2m-1)(2m-1)} \end{vmatrix}; \quad (15)$$

а с учетом (9) и (10) симметричные составляющие можно записать в виде

$$\begin{aligned}x^{(2i-1)} &= \sqrt{\frac{2}{m}} [x_1 + x_2 a^{(2i-1)} + x_3 a^{2(2i-1)} + \dots \\ &\dots + x_m a^{(m-1)(2i-1)}], \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (16)\end{aligned}$$

что, в частности, полностью согласуется с представлением о прямой и обратной последовательности в двухфазной системе [7].

Для электрической машины с m -фазной распределенной обмоткой на статоре и n -фазной распределенной обмоткой на роторе найдем значения индуктивных параметров. Введем допущения: магнитная система ненасыщена, потоки рассеяния отсутствуют, воздушный зазор равномерный, влияние зубчатости статора и ротора учитывается коэффициентами Картера. При $m=2k+1$ получим:

$$\|L^{ss}\| = \begin{vmatrix} L_{11}^{ss} & L_{12}^{ss} & \dots & L_{1m}^{ss} \\ L_{21}^{ss} & L_{22}^{ss} & \dots & L_{2m}^{ss} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{m1}^{ss} & L_{m2}^{ss} & \dots & L_{mm}^{ss} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_{11}^{ss} & L_{12}^{ss} & \dots & L_{1m}^{ss} \\ L_{1m}^{ss} & L_{11}^{ss} & \dots & L_{1,m-1}^{ss} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{12}^{ss} & L_{13}^{ss} & \dots & L_{11}^{ss} \end{vmatrix}; \quad (17)$$

$$\begin{aligned}L_{ij}^{ss} &= L^{ss} \cos \left[\frac{m-1}{m} \pi (i-j) \right]; \quad i, j = 1, 2, \dots, m; \\ L_{kl}^{rr} &= L^{rr} \cos \left[\frac{n-1}{n} \pi (k-l) \right]; \quad k, l = 1, 2, \dots, n; \quad (18)\end{aligned}$$

$$L_{ik}^{sr} = L^{sr} \cos \left[\theta + \frac{m-1}{m} \pi (i-1) - \frac{(n-1)}{n} \pi (k-1) \right];$$

$$\|L^{sr}\| = L^{sr} \begin{vmatrix} \cos \theta & \cos (\theta-\beta) & \dots & \cos [\theta - (n-1)\beta] \\ \cos (\theta+\alpha) & \cos (\theta+\alpha-\beta) & \dots & \cos [\theta+\alpha - (n-1)\beta] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos [\theta+(m-1)\alpha] & \cos [\theta+(m-1)\alpha-\beta] & \dots & \cos [\theta+(m-1)\alpha - (n-1)\beta] \end{vmatrix}; \quad (19)$$

где $\alpha = \pi(m-1)/m$; $\beta = \pi(n-1)/n$; θ — угол положения ротора. Если m или n — четное число, то, например, матрица собственных индуктивностей для статорной обмотки будет выглядеть следующим образом:

$$\|L^{ss}\| = \begin{vmatrix} L_{11}^{ss} & L_{12}^{ss} & \dots & L_{1m}^{ss} & -L_{11}^{ss} & -L_{12}^{ss} & \dots & -L_{1m}^{ss} \\ L_{1m}^{ss} & L_{11}^{ss} & \dots & L_{1,m-1}^{ss} & -L_{1m}^{ss} & -L_{11}^{ss} & \dots & -L_{1,m-1}^{ss} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{12}^{ss} & L_{13}^{ss} & \dots & L_{11}^{ss} & -L_{12}^{ss} & -L_{13}^{ss} & \dots & -L_{11}^{ss} \\ -L_{11}^{ss} & -L_{12}^{ss} & \dots & -L_{1m}^{ss} & L_{11}^{ss} & L_{12}^{ss} & \dots & L_{1m}^{ss} \\ -L_{1m}^{ss} & -L_{11}^{ss} & \dots & -L_{1,m-1}^{ss} & L_{1m}^{ss} & L_{11}^{ss} & \dots & L_{1,m-1}^{ss} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -L_{12}^{ss} & -L_{13}^{ss} & \dots & -L_{11}^{ss} & L_{12}^{ss} & L_{13}^{ss} & \dots & L_{11}^{ss} \end{vmatrix}; \quad (20)$$

Выполнив преобразование:

$$\|L_s^{ss}\| = \|S\|_{mm}^{-1} \|L^{ss}\|_{mm} \|S\|_{mm}; \quad (21)$$

$$\|L_s^{rr}\| = \|S\|_{nn}^{-1} \|L^{rr}\|_{nn} \|S\|_{nn}; \quad (22)$$

$$\|L_s^{sr}\| = \|S\|_{mm}^{-1} \|L^{sr}\|_{mn} \|S\|_{nn}, \quad (23)$$

получим выражение для индуктивных параметров, записанных в системе уравнений электрического равновесия через симметричные составляющие. При m и n — нечетном:

$$\|L_s^{ss}\| = \text{diag} \{ L_{00s}^{ss}, L_{11s}^{ss}, \dots, L_{m-1,m-1s}^{ss} \}_{mm};$$

$$L_{jjs}^{ss} = \sum_{i=1}^m L_{1i} a^{-j(i-1)}; \quad j=0, 1, \dots, m-1; \quad (24)$$

при m или n — четном:

$$\begin{aligned}\|L_s^{ss}\| &= \text{diag} \{ 0, L_{11s}^{ss}, 0, L_{33s}^{ss}, 0, \dots, L_{2m-1,2m-1s}^{ss} \}_{2m,2m}; \\ L_{jjs}^{ss} &= 2 \sum_{i=1}^m L_{1i} a^{-j(i-1)}; \quad j=1, 3, \dots, 2m-1. \quad (25)\end{aligned}$$

Преобразованная матрица $\|L_s^{sr}\|$ в зависимости от числа фаз статорной и роторной обмоток может иметь размерность $m \cdot n$, $m \cdot 2n$, $2m \cdot n$, $2m \cdot 2n$. Все ее элементы равны нулю за исключением двух, расположенных на пересечении второго столбца и второй строки, а также последнего столбца и последней строки. При условии m и n — нечетные числа:

$$L_{22s}^{sr} = \frac{\sqrt{mn}}{2} L^{sr} e^{j\theta}; \quad L_{mns}^{sr} = \frac{\sqrt{mn}}{2} L^{sr} e^{-j\theta}; \quad (26)$$

$$L_{22s}^{rs} = \frac{\sqrt{mn}}{2} L^{rs} e^{-j\theta}; \quad L_{nms}^{rs} = \frac{\sqrt{mn}}{2} L^{rs} e^{j\theta}. \quad (27)$$

Если, например, $m=2k$; $n=2l+1$, то в подкоренном выражении (26), (27) вместо произведения mn будет $2mn$ и т.д. В [8] для индуктивных параметров электрических машин с ДРО получены такие же выражения, как (19), (26), (27).

Если кривые напряжений и токов — синусоиды, то уравнение для полной и активной мощности, записанное через симметричные составляющие, может быть получено в общем виде:

$$P = \|i\|_T \|u\| = \|\dot{I}_s\|_T \|\dot{S}\|_T \|S\| \|\dot{U}_s\| = \|\dot{I}_s\|_T \|\dot{U}_s\|, \quad (28)$$

где

$$\|\dot{I}_s\| = \text{colon} \left\{ \dot{I}^{(0)}, \dot{I}^{(1)}, \dots, \dot{I}^{(m-1)} \right\}, \quad m = 3, 5, 7, \dots;$$

$$\|\dot{U}_s\| = \text{colon} \left\{ \dot{U}^{(0)}, \dot{U}^{(1)}, \dots, \dot{U}^{(m-1)} \right\}, \quad k = 1, 2, \dots, m;$$

$$i_k = I_m \cos \left[\omega t - \frac{m-1}{m} \pi (k-1) + j \right] = \frac{1}{2} (\dot{I}_{km} e^{j\omega t} + \dot{I}_{km}^* e^{-j\omega t});$$

$$u_k = U_m \cos \left[\omega t - \frac{m-1}{m} \pi (k-1) + \eta \right] = \frac{1}{2} (\dot{U}_{km} e^{j\omega t} + \dot{U}_{km}^* e^{-j\omega t});$$

$$\dot{I}^{(k-1)} = \frac{1}{\sqrt{m}} \sum_{j=1}^m i_j a^{-(k-1)(j-1)};$$

$$\dot{U}^{(k-1)} = \frac{1}{\sqrt{m}} \sum_{j=1}^m u_j a^{(k-1)(j-1)}. \quad (29)$$

Введем обозначения:

$$\dot{I}_{m+}^{(k-1)} = \frac{1}{\sqrt{m}} \sum_{j=1}^m \dot{I}_{jm} a^{-(k-1)(j-1)};$$

$$\dot{U}_{m+}^{(k-1)} = \frac{1}{\sqrt{m}} \sum_{j=1}^m \dot{U}_{jm} a^{(k-1)(j-1)};$$

$$\dot{I}_{m-}^{(k-1)} = \frac{1}{\sqrt{m}} \sum_{j=1}^m \dot{I}_{jm}^* a^{-(k-1)(j-1)};$$

$$\dot{U}_{m-}^{(k-1)} = \frac{1}{\sqrt{m}} \sum_{j=1}^m \dot{U}_{jm}^* a^{(k-1)(j-1)}. \quad (30)$$

С учетом (7) среднее значение активной мощности

$$P_a = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \dot{I}_{m+}^{(0)} \dot{U}_{m+}^{(0)} + \sum_{j=1}^{0,5(m-1)} [\dot{I}_{m+}^{(2j-1)} \dot{U}_{m-}^{(2j-1)} + \dot{I}_{m-}^{(2j-1)} \dot{U}_{m+}^{(2j-1)}] \right\}. \quad (31)$$

Аналогично, принимая во внимание, что векторы (16) представляют собой попарно сопряженные комплексы, для случая $m=2k$ запишем выражение средней мощности P_a в общем виде:

$$P_a = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \sum_{j=1}^m \dot{I}_{m-}^{(2j-1)} \dot{U}_{m+}^{(2j-1)} \right\}. \quad (32)$$

Сравнивая полученные результаты, и прежде всего (16), (25), (32), с известными выражениями [7], обратим внимание на следующие факты:

вопреки ожиданиям, преобразование m -фазной системы в $2m$ -фазную (9)–(14) не привело к увеличению числа уравнений, записанных через симметричные составляющие. Уравнение для средней мощности P_a также содержит только m независимых переменных;

в системах с характеристическим углом $\delta=2\pi/m$ для сохранения инвариантности билинейной формы приходилось искусственно вводить линейные коэффициенты (как это, например, сделано для составляющих прямой и обратной последовательности в двухфазных преобразованиях). Полученное уравнение (16) с дополнительным условием (9), (10) сразу дает требуемый результат;

поскольку для $m=2k+1$ выполняется условие (7), а для $m=2k$ $\dot{x}^{(i)} = \dot{x}^{*(2m-i)}$, где $i=1, 3, \dots, m-1$ (нулевая и все четные симметричные составляющие равны нулю), преобразование исходных переменных к двухфазным вещественным составляющим

$$\|x_T\| = \|T\|^{-1} \|x\|$$

будет иметь общепринятый вид.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калужский Д.Л. Электрические машины с дискретно-распределенными обмотками для низкоскоростных электроприводов. — Электротехника, 1997, № 9.
2. Борзяк Ю.Г., Зайков М.А., Наний В.П. Электродвигатели с катящимся ротором. — Киев: Техника, 1982.
3. А.с. № 1674321 (СССР) Синхронный редукторный двигатель / Д.Л. Калужский и др. — Оpubл. в БИ, 1991, № 32.
4. Калужский Д.Л., Кутузов Е.И., Ким Т.Д. Реактивный двигатель с расщепленной обмоткой для прецизионных электроприводов. — В кн.: Сб. докладов Всесоюзной конференции «Современные проблемы электромеханики». — М.: МЭИ, 1989.
5. А.с. № 1817198 (СССР) Асинхронный многополюсный двигатель / Д.Л. Калужский, В.В. Пастухов. — Оpubл. в БИ, 1993, № 19.
6. Жерве Г.Г. Обмотки электрических машин. — Л.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. — М.: Энергия, 1964.
8. Веселовский О.Н., Калужский Д.Л. К определению взаимоиндуктивных параметров электрических машин с дискретно-распределенными обмотками. — В кн.: Сб. докладов Научно-технической конференции с международным участием «Проблемы промышленных электромеханических систем и перспективы их развития». — Ульяновск, УГТУ, 1996.

[07.04.97]

А в т о р: Калужский Дмитрий Леонидович окончил электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института в 1980 г. В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию в области исследования электрических машин. Работает на кафедре общей электротехники Новосибирского государственного технического университета.

Управление возбуждением синхронного двигателя в режимах пуска и ресинхронизации

СИВОКОБЫЛЕНКО В.Ф., КРАСНОКУТСКАЯ Г.В.

Предложен способ и устройство управления возбуждением синхронного двигателя в режимах пуска и ресинхронизации, позволяющие повысить результирующую устойчивость сильно загруженных синхронных двигателей за счет увеличения вращающего момента в режимах чередующихся подключений обмотки возбуждения к возбудителю или к добавочному активному сопротивлению. Приведены результаты исследования на математической модели поведения синхронного двигателя в указанных режимах и результаты моделирования работы устройства управления возбуждением. Показано, что момент может быть увеличен за счет предлагаемого управления на 20—30% при скорости вращения ротора, равной 0,95 отн.ед.

Ключевые слова: синхронный двигатель, обмотка возбуждения, управление возбуждением, электромагнитный момент, устойчивость, математическое моделирование

Благодаря известным преимуществам синхронных двигателей (СД), они широко применяются в схемах электроснабжения промышленных предприятий. Однако при кратковременных перерывах питания СД могут выпадать из синхронизма и отключаться от сети из-за невозможности ресинхронизации вследствие большой загрузки механизма и недостаточного электромагнитного момента. Для обеспечения успешности ресинхронизации, повторного пуска, самозапуска СД требуется предварительная разгрузка агрегата или проведение мероприятий по улучшению моментной характеристики СД. Предварительная разгрузка агрегата в условиях действующих производств обычно трудно осуществима.

Одним из путей улучшения моментной характеристики СД является применение оптимальных законов управления по цепям возбуждения в сочетании с соответствующей структурной модернизацией систем возбуждения. Предлагаемый в [1] способ повышения электромагнитного момента СД путем ступенчатого или плавного изменения значения гасительного сопротивления в цепи обмотки возбуждения (ОВ) в функции скольжения s недостаточно эффективен, так как приводит к незначительному росту асинхронного момента в области малых скольжений. Способы управления, предполагающие использование информации об угле положения ротора δ , требуют установки специальных датчиков на валу машины или применения устройств для косвенного определения δ .

Описанные в [2, 3] способы повышения электромагнитного момента СД за счет подачи в обмотку возбуждения напряжения, изменяюще-

A method and device for controlling excitation of a asynchronous motor under starting and resynchronizing regimes are proposed which make it possible to improve the resulting stability of heavily loaded motors by means of increasing the electromagnetic torque in regimes of alternating switching an excitation winding to an excitor or to additional resistance. Results of investigating the behaviour of the motor under regimes considered with the use a mathematical model and results of modelling the operation of the device proposed are given. It is shown that the torque can be raised by 20—30% at the angular speed equal to 0,95 p.u.

Key words: synchronous motor, excitation winding, excitation process control, electromagnetic torque, stability, simulation

гося с частотой скольжения или циклической подачи возбуждения в сочетании с дискретным изменением добавочного активного сопротивления в цепи ОВ, не нашли широкого применения из-за сложности их реализации. Предложенное в [3] устройство управления возбуждением (УУВ) по углу положения ротора δ и скольжению s (определяемым косвенно путем моделирования ЭДС, наводимой в ОВ полем статора), требует знания параметров схемы замещения конкретного двигателя и введения коррекции, так как параметры СД изменяются под влиянием температуры нагрева ротора, вытеснения тока в роторе, насыщения магнитных цепей и др.

Статья посвящена совершенствованию способов [2, 3] за счет разработки более рационального закона управления по цепи ОВ [4] и устройства для его реализации, не требующих специальных датчиков угла положения ротора или знания параметров схемы замещения конкретного СД для косвенного определения δ .

Исследования известных и предлагаемого способов управления возбуждением проводились на математической модели СД, представленной полными уравнениями Парка—Горева, записанными в осях d, q (в отн. ед.):

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{sd} &= u_{sd} - i_{sd}r_s + \omega\Psi_{sq}; \\ p\Psi_{sq} &= u_{sq} - i_{sq}r_s - \omega\Psi_{sd}; \\ p\Psi_{rd} &= -i_d r_{rd}; \\ p\Psi_{rq} &= -i_q r_{rq}; \\ p\Psi_f &= -(r_f + r_{доб})i_f + u_f; \\ p\omega &= (m - m_c)/J; \\ p\gamma &= \omega; \\ m &= \Psi_{sd}i_{sq} - \Psi_{sq}i_{sd}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Сущность разработанного закона управления по цепи ОВ изложена в [4] и заключается в том, что в зависимости от знака производной от электромагнитного вращающего момента m при каждом провороте ротора относительно поля статора в определенные моменты времени производится переключение ОВ то на активное добавочное (пусковое) сопротивление, то на возбудитель с форсированным напряжением требуемой полярности. Указанные моменты времени, в которые необходимо производить переключения в цепи ОВ, определяются по изменению знака производной от мгновенного электромагнитного момента pm СД. При отрицательной производной к ОВ подключается активное сопротивление $r_{доб} = k_n r_f$ (k_n — кратность пускового сопротивления, r_f — активное сопротивление обмотки возбуждения), а при положительной производной момента добавочное сопротивление отключается ($r_{доб} = 0$) и в ОВ подается от возбудителя с двухсторонней проводимостью форсированное напряжение возбуждения $u_f = k_\phi u_{fn}$ (k_ϕ — кратность форсировки), полярность которого соответствует знаку производной тока i_f в ОВ. Отметим также, что вместо активного добавочного сопротивления можно использовать инверторный режим тиристорного возбудителя.

Исследование режимов пуска и ресинхронизации СД с применением предлагаемого закона управления проводилось по уравнениям (1), а также по уравнениям, описывающим функционирование УУВ:

$$pm = L_{\sigma}^{-1} (\Psi_{md} p \Psi_{sq} - \Psi_{mq} p \Psi_{sd} - \Psi_{sd} p \Psi_{mq} + \Psi_{sq} p \Psi_{md}); \quad (2)$$

$$p i_f = L_{\sigma}^{-1} (p \Psi_f - p \Psi_{md}); \quad (3)$$

$$r_{доб} = k_n r_f (1 - \text{sign}(pm))/2; \quad (4)$$

$$u_f = k_\phi u_{fn} (1 + \text{sign}(pm)) \text{sign}(p i_f)/2, \quad (5)$$

где потокосцепления намагничивания, коэффициенты распределения и токи вычисляются согласно [5]:

$$p \Psi_{md} = a_{sd} p \Psi_{sd} + a_{rd} p \Psi_{rd} + a_f p \Psi_f; \quad (6)$$

$$p \Psi_{mq} = a_{sq} p \Psi_{sq} + a_{rd} p \Psi_{rq}; \quad (7)$$

$$a_{sd} = L_{srd} L_{\sigma}^{-1}; \quad a_{sq} = L_{srq} L_{\sigma}^{-1};$$

$$A_{rd} = L_{srd} L_{\sigma}^{-1}; \quad a_{rq} = L_{srq} L_{\sigma}^{-1};$$

$$a_f = L_{srd} L_{\sigma}^{-1};$$

$$L_{srd} = (L_{\sigma}^{-1} + L_{md}^{-1} + L_{ord}^{-1} + L_{of}^{-1})^{-1};$$

$$L_{srq} = (L_{\sigma}^{-1} + L_{mq}^{-1} + L_{ord}^{-1})^{-1};$$

$$i_{sd} = L_{\sigma}^{-1} (\Psi_{sd} - \Psi_{md}); \quad i_{sq} = L_{\sigma}^{-1} (\Psi_{sq} - \Psi_{mq});$$

$$i_{rd} = L_{ord}^{-1} (\Psi_{rd} - \Psi_{md}); \quad i_{rq} = L_{ord}^{-1} (\Psi_{rq} - \Psi_{mq});$$

$$i_f = L_{of}^{-1} (\Psi_f - \Psi_{md}).$$

Результаты моделирования показали, что оптимальное циклическое управление возбуждением имеет место при использовании знаков произ-

водных потокосцеплений намагничивания $p \Psi_{md}$ и $p \Psi_{mq}$ (6) и (7). Предлагаемое управление по знаку производной электромагнитного момента pm (2) в зависимости от частоты вращения ротора имеет некоторое упреждение или запаздывание по сравнению с упомянутым оптимальным.

Проведенные исследования показали, что предлагаемый способ управления позволяет увеличить вращающий момент СД при частоте вращения ротора свыше 0,8 отн. ед. При этом, чем больше частота вращения, тем больше относительное приращение вращающего момента, которое по сравнению с асинхронным пуском при пятикратном пусковом резисторе в цепи ОВ составляет в среднем для $k_\phi = 1,4$, $k_n = 5$ при: $\omega = 0,95$ отн. ед. — 20–30%, $\omega = 0,96$ отн. ед. — 50%, $\omega = 0,97$ отн. ед. — 80%, $\omega = 0,98$ — 160%, $\omega = 0,99$ — 400%. При увеличении k_ϕ эффект также возрастает.

В качестве примера на рис. 1 изображен фрагмент временной диаграммы пуска (ресинхронизации) СД типа СДЗ-2209-60 привода механизма с постоянным моментом сопротивления.

Каталожные данные двигателя СДЗ-2209-60: $P_n = 2460$ кВт; $U_n = 6000$ В; $I_n = 274$ А; $GD^2 = 230$ т·м²; $\cos \varphi = 0,9$; $\eta_n = 0,938$; $M_n = 1,5$ отн. ед.; $M_{max} = 2,3$ отн. ед.; $M_{\text{вх}}^{0,05} = 1,2$ отн. ед.; $k_i = 5,2$ отн. ед.; $I_{fn} = 275$ А; $U_{fn} = 192$ В; $n = 100$ об/мин.

Параметры двигателя, принятые при моделировании (отн. ед.): $r_s = 0,0155$; $x_{\sigma} = 0,0962$; $x_{ad} = 1,2$; $r_{rq} = 0,0761$; $x_{aq} = 0,682$; $r_{rd} = 0,1014$; $x_{ord} = 0,1224$; $r_f = 0,00316$; $x_{of} = 0,229$; $x_{srq} = 0,0918$; $T_d' = 91,3$ рад.

Временная диаграмма иллюстрирует характер изменения частоты вращения ротора ω , тока в обмотке возбуждения i_f , электромагнитного момента m , добавочного сопротивления $r_{доб}$ и напряжения возбуждения u_f , угла вылета ротора δ , тока в фазе статора i_a . При моделировании были приняты: коэффициент загрузки $k_3 = 1/P_n$, напряжение на секции $u_c = 1$ отн. ед., внешнее сопротивление $x_{в.ш} = 0$. Значения добавочного сопротивления $r_{доб}$ и напряжения возбуждения u_f на выходе возбудителя изменялись в соответствии с зависимостями (4) и (5). Из неподвижного состояния пуск СД производился с ОВ, замкнутой на постоянное сопротивление $r_{доб} = 5r_f$. При достижении ротором частоты $\omega_1 = 0,92$ отн. ед. было введено в работу устройство управления возбуждением, с помощью которого ОВ подключается к возбудителю с отрицательным форсированным напряжением возбуждения, так как производная тока ротора была отрицательна в момент подключения. Затем ОВ переключается на добавочное сопротивление при максимуме момента, при минимуме момента ОВ подключается к возбудителю с положительным форсированным напряжением, так как производная тока ротора положительна. Переключения продолжались в соответствии с

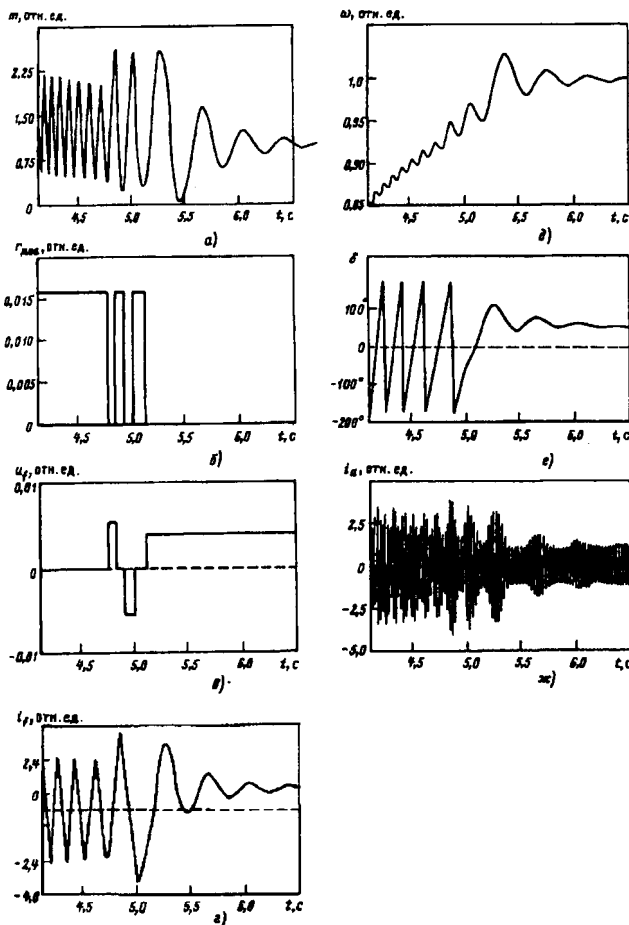


Рис. 1. Фрагмент временной диаграммы пуска СД типа СДЗ-2209-60 с применением предлагаемого закона управления

(11) и (12) в течение одного проворота ротора, благодаря чему имело место увеличение вращающего момента. При частоте $\omega_2 = 0,95$ отн. ед. была прекращена работа УУВ, а на ОВ было подано постоянное напряжение возбуждения, после чего двигатель втянулся в синхронизм.

Для сравнения эффективности перечисленных известных законов управления и предлагаемого при моделировании с помощью математической модели СД (1) производился расчет среднего значения вращающего момента $M_{ср}$ за время одного проворота ротора СД относительно поля статора. При этом частота вращения ротора ω задавалась постоянной. Шаг интегрирования был принят $0,1\pi$ рад. Результаты расчетов для двигателя СДЗ-2209-60 приведены на рис. 2. Так как реальное УУВ имеет определенное время срабатывания, производился анализ влияния на эффективность управления запаздывания, вносимого УУВ при подаче сигналов на переключения в цепи ОВ. На рис. 2 показаны зависимости электромагнитного момента $M_{ср}$ от частоты вращения ω : 1 — при разгоне с ОВ, замкнутой на постоянное активное пусковое сопротивление $r_{доб} = 5r_f$; 2 — разгоне с активным сопротив-

лением, изменяющимся в функции от скольжения ($r_{доб}$ не более $5r_f$), по [1]: $r_{доб} = r_f(sT_d' - 1)$; 3 — подаче циклического возбуждения ($k_\phi = 1,4$), чередующегося с гашением поля на сопротивление $r_{доб}$ по [3]: $r_{доб} = k_\pi r_f(1 - \text{sign}(\sin \delta - \varphi) \text{sign}(i_f))/2$; $k_\pi = 5$; $u_f = k_\phi u_{fn}(1 - \text{sign}(\sin \delta - \varphi))/2$; $\varphi = \arctg sT_d'$; 4–7 — управления по предлагаемому способу при запаздывании в переключениях ОВ, равных соответственно 0, 10, 20 мсек, оптимальном ($k_\pi = 5$, $k_\phi = 1,4$); 8, 9 — управлении по предлагаемому способу с однополярным возбуждением при соответственно нулевом и оптимальном запаздывании в переключениях ОВ ($k_\pi = 5$; $k_\phi = 1,4$); 10, 11 — управлении по предлагаемому способу при соответственно нулевом и оптимальном запаздывании в переключениях ОВ ($k_\pi = 5$; $k_\phi = 2,8$); 12 — разгоне с постоянным сопротивлением $r_{доб} = 10r_f$; 13, 14 — управлении по предлагаемому способу при соответственно нулевом и оптимальном запаздывании в переключениях ($k_\phi = 1,4$; $k_\pi = 10$).

Рассматривался диапазон скольжений, в ко-

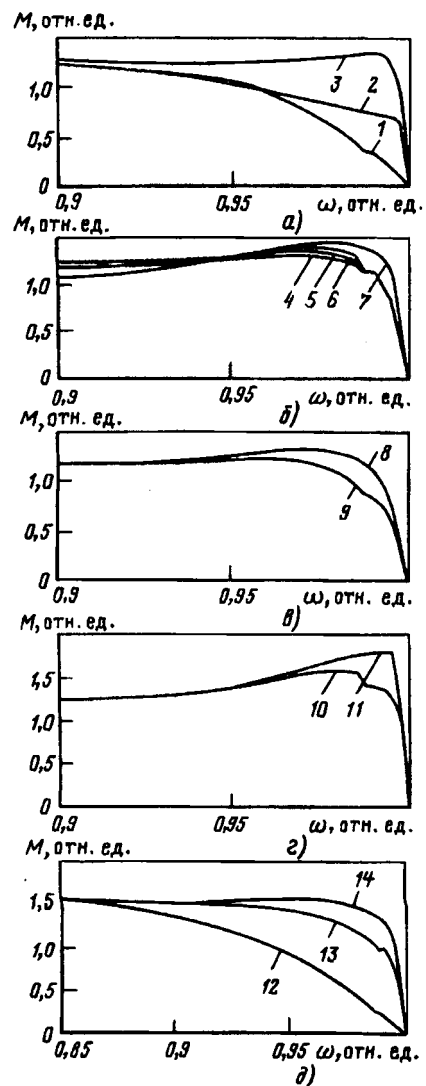


Рис. 2. Зависимость электромагнитного момента $M_{ср}$ от частоты вращения ω для двигателя СДЗ-2209-60

тором законы управления дают больший эффект по среднему вращающему моменту, чем разгон с постоянным пусковым резистором. Закон управления [2] не рассматривался, так как [3] является его развитием: они равноэффективны. Из рис. 2 видно, что при управлении по способу [1] некоторое увеличение момента достигается при скорости 0,96 отн. ед. и выше (значение добавочного сопротивления ограничено значением $5r_f$). Наибольший выигрыш в среднем вращающем моменте имеет место при способах [3] и [4]. Использование управления [4] дает момент несколько ниже, чем [3] в диапазонах скоростей от 0,94 до 0,98 отн. ед. в том случае, если запаздывание в переключениях в цепях ОВ изменяется неоптимальным способом. Анализ показал, что для предлагаемого управления запаздывание в пределах 10–20 мс (кривые 5 и 6) приводит к уменьшению среднего вращающего момента при частоте вращения ротора, меньшей 0,94 отн. ед., а при частоте, большей 0,94 отн. ед., — к увеличению момента по сравнению со случаем, когда вносимое УУВ запаздывание равно нулю (кривая 4). Из рис. 2 также следует, что время срабатывания выходного органа УУВ в простом варианте должно составлять около 10 мс. Кривая 7 соответствует случаю, когда запаздывание для каждого значения скорости выбирается оптимальным образом по условию обеспечения максимально возможного при этой скорости значения моменты. Чем выше скорость в этом случае, тем больше должно быть запаздывание, причем зависимость имеет нелинейный характер. При использовании однополярного возбуждения (кривые 8, 9) максимальное понижение момента по сравнению с кривыми 4, 7 равно 30% при частоте 0,99 отн. ед., при частоте, меньшей 0,98 отн. ед., — менее 12%, при 0,95 отн. ед. — почти нет понижения.

С увеличением кратности форсировки (кривые 10, 11) эффект от управления увеличивается; для машин с меньшими T_d' этот прирост больше. Анализ кривых 12–14 на рис. 2 показывает, что с увеличением добавочного сопротивления расширяется диапазон скоростей, на котором эффект от применения способа выше, чем при разгоне на постоянном сопротивлении того же значения.

Реализуемый предлагаемый способ УУВ основан на измерении мгновенных значений напряжений и токов статора, а также тока ротора, с помощью которых вычисляется мгновенный электромагнитный момент, определяемый как мгновенная мощность за вычетом потерь в меди статора:

$$m = i_a u_a + i_b u_b + i_c u_c - (i_a^2 r_a + i_b^2 r_b + i_c^2 r_c),$$

где $i_a, i_b, i_c, u_a, u_b, u_c$ — мгновенные значения фазных токов и напряжений статора; r_a, r_b, r_c — активные сопротивления обмоток статора (с учетом сопротивлений питающих кабелей).

Моделирование режимов пуска и ресинхронизации СД типа СДЗ-2209-60 при $x_{в.ш}=0$; $k_p=5$; $k_\phi=1,4$; $\cos \varphi=1$; $\omega_1=0,925$ отн. ед.; $\omega_2=0,95$ отн. ед. при запаздывании относительно оптимальных моментов переключений ОВ 25 мс показало следующее. Если напряжение на секции $u_c=1,0$ отн. ед., успешное втягивание машины в синхронизм происходит при $k_3=1,23P_H$ с управлением возбуждением по предлагаемому способу. А без управления при пуске с пятикратным резистором и при подаче возбуждения на ОВ в наиболее благоприятный момент (момент перехода тока i_f через 0) СД входит в синхронизм при $k_3=1,08P_H$. Если $u_c=0,9$ отн. ед., втягивание в синхронизм в первом случае происходит при $k_3=1,0$ отн. ед., во втором — при $k_3=0,84P_H$. При $u_c=0,8$ отн. ед. двигатель удастся синхронизировать, применяя управление при $k_3=0,79P_H$, а без управления — при $k_3=0,63P_H$ и т.д.

Один из вариантов реализации предлагаемого способа приведен на рис. 3. Схема содержит пускозащитное устройство ПЗУ, состоящее из тиристоров $VD1, VD2$, добавочного пускового сопротивления $R_{доб}$ и стабилитронов $VD3, VD4$. Два тиристорных преобразователя $CB1$ и $CB2$ со схемами управления $CY1, CY2$ образуют реверсивный возбудитель, который может работать как в выпрямительном, так и в инверторном режимах. Устройство УВ подключено к трансформаторам тока $TA1-TA3$ в цепи статора и $TA4$ в цепи ротора, к трансформатору напряжения питающей сети TV . Устройство содержит блоки: преобразования входных сигналов БП, вычислений и логической обработки БВЛ, а также выходной орган ВО, который содержит: реле выпрямительного режима $KL1$, реле инверторного режима $KL2$, реле $KL3$ управления тиристорами ПЗУ. В блоке вычислений и логики кроме определения скольжения, производных момента и тока в ОВ реализуется также выявление асинхронного режима (защита от АР) для запуска УУВ. Принцип действия защиты от АР состоит в определении мгновенного значения угла сдвига фаз между током и напряжением статора [6].

Пуск СД с помощью УУВ из неподвижного состояния до частоты ω_1 (задается равной или большей 0,85 отн. ед.) осуществляется на активном добавочном сопротивлении $r_{доб}$ с помощью ПЗУ. Затем пусковой орган защиты от асинхронного режима, если частота вращения ротора превысит ω_1 , разрешает работу выходного органа УУВ. Реле $KL3$ отключает ПЗУ и в зависимости от знака производной момента реле $KL1, KL2$ переводят поочередно $B1$ или $B2$ в выпрямительный или инверторный режим. При достижении частотой вращения значения ω_2 (выбирается равной или большей 0,95 отн. ед.) прекращается работа УУВ и подается постоянное возбуждение в ротор, в результате чего СД втягивается в синхронизм.

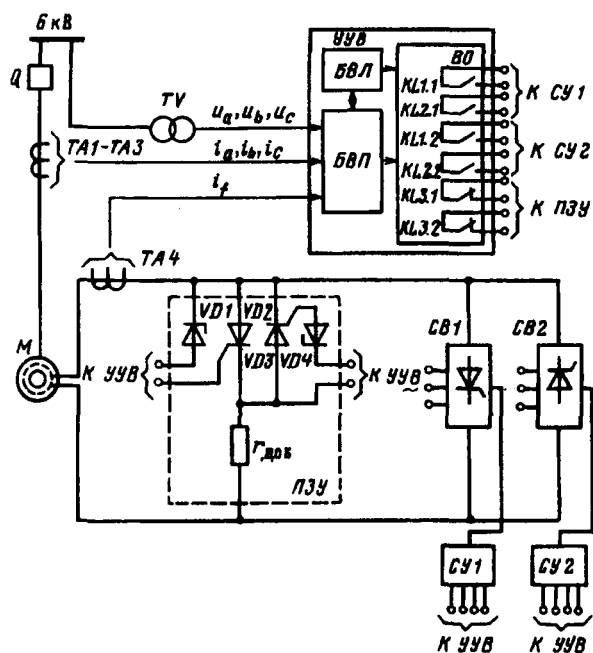


Рис. 3. Функциональная схема системы возбуждения с предлагаемым УУВ

При выходе из синхронизма СД из-за кратковременного перерыва питания защита от асинхронного режима снимает возбуждение и после восстановления питания вводит в работу УУВ, как это было описано ранее (как при пуске).

При таком подходе независимо от причины выхода из синхронизма СД (симметричные и несимметричные КЗ, потеря питания и др.) Устройство УВ вступает в действие только после ликвидации КЗ и восстановления питания и поэтому не мешает работе штатной форсировки. Устройство УВ является индивидуальным, а не групповым, поэтому каждый двигатель самостоятельно разгоняется под управлением собственного УУВ, а темпы разгона зависят от состава узла нагрузки и условий.

Предлагаемый способ управления параметрами цепи обмотки возбуждения разрабатывался как один из алгоритмов для программы работы микропроцессорного устройства защиты и управления СД в асинхронных режимах. Одной из реализаций УУВ является универсальный микропроцессорный модуль для целей РЗ и А, построенный на сериях БИС К1802, 1804. Модуль содержит следующие блоки: микропроцессора (16–32 разряда), ОЗУ, ПЗУ, микропрограммного управления, синхронизации, блок ускоренного умножения на основе БИС 1518ВЖ1, а также схему связи с СД. Частота дискретизации входных сигналов $f=1$ кГц. Схема связи с СД содержит: преобразователи токов и напряжений (включая трансформаторы тока и напряжения в цепи статора, трансформаторный датчик в цепи ОВ), аналоговые полосовые фильтры, масштабирующие усилители, управляемые программно,

АЦП, мультиплексор цифровых сигналов для ввода цифровых эквивалентов входных токов и напряжений в микропроцессорную часть УУВ. Цифровые эквиваленты входных сигналов обрабатываются в модуле в соответствии с предлагаемым законом управления, а воздействие на управляемый СД производится в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.

Так как погрешности в определении мгновенного момента зависят от характеристик схемы ввода аналоговых сигналов, то эти характеристики выбирались такими, чтобы погрешность в вычислении момента не превышала 3%, что мало отражается на эффективности управления. Мгновенный электромагнитный момент и ток в обмотке возбуждения дифференцировались численными методами, в частности, с использованием выражения

$$y_0' = (25y_0 - 48y_1 + 36y_2 - 16y_3 + 3y_4)/12h.$$

Вывод. Реализация способа позволяет обеспечить улучшение условий пуска сильно нагруженных машин и повысить надежность их работы. Достоинством предлагаемого способа является также то, что после окончания циклического управления возбуждением он обеспечивает автоматическую подачу постоянного напряжения возбуждения в оптимальный с точки зрения втягивания в синхронизм СД момент времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Соколов Н.И., Сумцов И.А., Кременецкий А.М. Ресинхронизация синхронных двигателей многократной форсировкой возбуждения. — Электричество, 1975, № 5.
3. Носов К.Б., Дворак Н.М. Средства и способы самозапуска электродвигателей. — Кемеровское кн. изд-во, 1985.
4. Пат. РФ 2014720. Способ пуска и самозапуска синхронного двигателя / В.Ф. Сивокобыленко, Г.В. Краснокутская. — Б.И., 1994, № 11.
5. Переходные процессы в многомашиных системах электроснабжения электрических станций. Уч. пособие / В.Ф. Сивокобыленко. — Донецк: ДПИ, 1984.
6. Ас. 1829080 (СССР). Устройство для защиты синхронных машин от асинхронного режима. / В.Ф. Сивокобыленко, Г.В. Краснокутская. — Б.И., 1993, № 27.

[28.08.97]

Авторы: Сивокобыленко Виталий Федорович окончил Харьковский политехнический институт в 1957 г. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Математическое моделирование и оптимизация переходных процессов в многомашиных системах электроснабжения электрических станций и промышленных установок» в Московском энергетическом институте. Заведующий кафедрой «Электрические станции» Донецкого государственного технического университета (ДонГТУ).

Краснокутская Галина Владимировна окончила факультет вычислительной техники Донецкого политехнического института в 1976 г. Ассистент кафедры «Электрические станции» ДонГТУ.

Синтез двухмассовой электромеханической системы стабилизации момента в упругом звене

БУРГИН Б.Ш.

Рассмотрен синтез астатической двухмассовой электромеханической системы стабилизации момента в упругом звене. Необходимые обратные связи реализуются посредством измерения угловой скорости двигателя и якорного тока, а также дифференцирующим фильтром второго порядка. Система дифференциальных уравнений описывает совместное действие входного и возмущающего сигналов, а также учитывает демпфирующий момент, который пропорционален угловой скорости второй массы. Характеристическое уравнение астатической системы имеет пятый порядок. Результаты синтеза иллюстрированы переходными характеристиками регулируемых координат двухмассовой электромеханической системы, полученными цифровым моделированием.

Ключевые слова: электропривод, астатическая двухмассовая электромеханическая система, стабилизация момента в упругом звене, моделирование

The paper presents a synthesis of a zero-constant-error two-mass electromechanical system of the shaft torque stabilization. The necessary feedbacks are realized by means of measuring the angular speed of a DC motor and the armature current and with the use of a second order differential filter. A system of differential equations describes the joint action of both input and disturbing signals, and allows for the damping torque, which is proportional to the angular speed of the second mass. The characteristic equation of system considered is of the fifth order. Results of the synthesis are illustrated by transient characteristics obtained by numerical modelling, controlled coordinates of the two-mass electromechanical system.

Key words: electrical drive, zero-constant-error two-mass electromechanical system, stabilization of a shaft torque, simulation

Задача поддержания момента или усилия в упругом звене актуальна для ряда механизмов, кинематическую схему которых можно представить двухмассовой. К таким механизмам относятся буксирные, таловые, аэростатные и грузоподъемные лебедки, испытательные стенды для длинных валов и ряд других механизмов. Стабилизация момента или усилия в упругом звене двухмассовой электромеханической системы (ДЭМС) должны обеспечиваться как при покое, так и при движении.

Структурная схема линейной ДЭМС стабилизации момента в упругом звене с учетом действующей на валу второй массы диссипативной составляющей момента приведена на рис. 1. Диссипативная составляющая момента на валу второй массы, зависящая от угловой скорости второй массы, может быть даже незначительной,

но ее учет, как будет показано ниже, принципиально важен для управления рассматриваемой системой.

Структурной схеме рис. 1 соответствует следующая система уравнений:

$$\left\{ [U_{зм}(p) - \alpha_4 I_{уп}(p)] \frac{1}{K_1 T_2 p} - (\alpha_1 + \alpha_5 p) \omega_1(p) - \alpha_3 I_1(p) \right\} K_1 = U_d;$$

$$U_d(p) = k_E \omega_1(p) + r(1 + Tp) I_1(p);$$

$$J_1 p \omega_1(p) = k_m I_1(p) - k_m I_{уп}(p);$$

$$J_2 p \omega_2(p) = k_m I_{уп}(p) - k_m I_c(p) - \alpha_6 \omega_2(p);$$

$$k_m p I_{уп}(p) = C [\omega_1(p) - \omega_2(p)].$$

Выбор обратных связей определяется возможностью измерения угловой скорости ω_1 и тока I_1 двигателя, а также применения дифференцирующего фильтра второго порядка для оценки углового ускорения $\frac{d\omega_1}{dt}$ двигателя при измерении лишь угловой скорости ω_1 [1]:

$$\hat{p}\omega_1(p) = \frac{p\omega_1(p)}{T_\Phi^2 p^2 + 2\xi T_\Phi p + 1}.$$

Эта же оценка $\hat{p}\omega_1(p)$ используется для по-

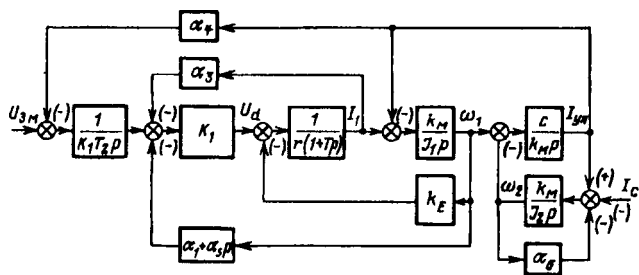


Рис. 1. Структурная схема ДЭМС стабилизации момента в упругом звене

лучения оценки момента в упругом звене

$$M_{\text{уп}} = k_m I_{\text{уп}};$$

$$\hat{I}_{\text{уп}}(p) = I_1(p) - J_1 p \hat{\omega}_1(p),$$

что позволяет обойтись без непосредственного измерения момента в упругом звене.

На основе базовых значений

$$U_{d0} = k_E \omega_0 = I_{K3} r; \quad B = \frac{(J_1 + J_2) r}{k_E k_m}$$

определим относительные переменные, относительное время и относительные значения параметров:

$$e^* = \frac{U_d}{U_{d0}}; \quad u_0^* = \frac{U_{3M}}{U_{d0}}; \quad \omega_1^* = \frac{\omega_1}{\omega_0}; \quad \omega_2^* = \frac{\omega_2}{\omega_0};$$

$$i_1^* = \frac{I_1}{I_{K3}}; \quad i_{\text{уп}}^* = \frac{I_{\text{уп}}}{I_{K3}}; \quad i_c^* = \frac{I_c}{I_{K3}}; \quad \tau = \frac{t}{B}; \quad p_* = Bp;$$

$$\tau_T = \frac{T}{B}; \quad \tau_2 = \frac{T_2}{B}; \quad u_1^* = \frac{u_0^*}{\tau_2}; \quad l_1 = \frac{\alpha_1 K_1}{k_E}; \quad l_3 = \frac{\alpha_3 K_1}{r};$$

$$l_4 = \frac{\alpha_4}{\tau_2 r}; \quad l_5 = \frac{\alpha_5 K_1}{k_E B}; \quad \varepsilon = \frac{\alpha_0 r}{k_E k_m}.$$

Система уравнений в относительных переменных и времени получит следующий вид:

$$(1 + l_1 + l_5 p_*) p_* \omega_1^*(p_*) + (1 + l_3 + \tau_T p_*) p_* i_1^*(p_*) + l_4 i_{\text{уп}}^*(p_*) = u_1^*(p_*);$$

$$q p_* \omega_1^*(p_*) - i_1^*(p_*) + i_{\text{уп}}^*(p_*) = 0;$$

$$[(1 - q) p_* + \varepsilon] \omega_2^*(p_*) - i_{\text{уп}}^*(p_*) = -i_c^*(p_*);$$

$$\omega_1^*(p_*) - \omega_2^*(p_*) - \frac{p_*}{q(1 - q) B^2 v^2} i_{\text{уп}}^*(p_*) = 0$$

или в матричной форме:

$$[A] \cdot [X] = [Q],$$

где

$$[A] = \begin{bmatrix} (1 + l_1 + l_5 p_*) p_* & 0 & (1 + l_3 + \tau_T p_*) p_* & l_4 \\ q p_* & 0 & -1 & 1 \\ 0 & [(1 - q) p_* + \varepsilon] & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & -\frac{p_*}{q(1 - q) B^2 v^2} \end{bmatrix};$$

$$[X] = \begin{bmatrix} \omega_1^*(p_*) \\ \omega_2^*(p_*) \\ i_1^*(p_*) \\ i_{\text{уп}}^*(p_*) \end{bmatrix}; \quad [Q] = \begin{bmatrix} u_1^*(p_*) \\ 0 \\ -i_c^*(p_*) \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$q = \frac{J_1}{J_1 + J_2}; \quad v = \sqrt{C \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}};$$

$$\det [A] = - \left\{ \frac{\tau_T}{B^2 v^2} p_*^5 + \frac{1 + l_3 + \frac{l_5}{q} + \frac{\tau_T \varepsilon}{1 - q}}{B^2 v^2} p_*^4 + \left[\tau_T + \frac{1 + l_1}{q B^2 v^2} + \frac{1 + l_3 + \frac{l_5}{q}}{(1 - q) B^2 v^2} \varepsilon \right] p_*^3 + \left[1 + l_3 + l_5 + \frac{(1 + l_1) \varepsilon}{q(1 - q) B^2 v^2} \right] p_*^2 + [(1 + l_1) + (1 - q) l_4 + (1 + l_3) \varepsilon] p_* + \varepsilon l_4 \right\} =$$

$$= - \frac{\tau_T}{B^2 v^2} \left\{ p_*^5 + A_1 \Omega_0 p_*^4 + A_2 \Omega_0^2 p_*^3 + A_3 \Omega_0^3 p_*^2 + A_4 \Omega_0^4 p_* + \Omega_0^5 \right\}.$$

Система уравнений параметров:

$$A_1 \Omega_0 = \frac{1 + l_3 + \frac{l_5}{q}}{\tau_T} + \frac{\varepsilon}{1 - q};$$

$$A_2 \Omega_0^2 = B^2 v^2 + \frac{1 + l_1}{q \tau_T} + \frac{1 + l_3 + \frac{l_5}{q}}{(1 - q) \tau_T} \varepsilon;$$

$$A_3 \Omega_0^3 = \frac{B^2 v^2}{\tau_T} (1 + l_3 + l_5) + \frac{1 + l_1}{q(1 - q) \tau_T} \varepsilon;$$

$$A_4 \Omega_0^4 = \frac{B^2 v^2}{\tau_T} [(1 + l_1) + (1 - q) l_4 + (1 + l_3) \varepsilon];$$

$$\Omega_0^5 = \frac{B^2 v^2}{\tau_T} l_4 \varepsilon.$$

Из этой системы необходимо определить l_1 , l_3 , l_4 , l_5 и Ω_0 для принятой величины ε и выбранной комбинации коэффициентов A_i .

Соответственно определим:

$$i_{\text{уп}}^*(p_*) = \frac{B^2 v^2}{\tau_T} \times \frac{[(1 - q) p_* + \varepsilon] u_1^*(p_*) + [\tau_T p_*^3 + (1 + l_3 + l_5) p_*^2 + (1 + l_1) p_*] i_c^*(p_*)}{p_*^5 + A_1 \Omega_0 p_*^4 + A_2 \Omega_0^2 p_*^3 + A_3 \Omega_0^3 p_*^2 + A_4 \Omega_0^4 p_* + \Omega_0^5};$$

$$\omega_1^*(p_*) = \frac{B^2 v^2}{\tau_T} \times$$

лучения оценки момента в упругом звене
 $M_{\text{уп}} = k_M I_{\text{уп}}$:

$$\hat{I}_{\text{уп}}(p) = I_1(p) - J_1 \hat{p} \omega_1(p),$$

что позволяет обойтись без непосредственного измерения момента в упругом звене.

На основе базовых значений

$$U_{d0} = k_E \omega_0 = I_{\text{кз}} r; \quad B = \frac{(J_1 + J_2) r}{k_E k_M}$$

определим относительные переменные, относительное время и относительные значения параметров:

$$e^* = \frac{U_d}{U_{d0}}; \quad u_0^* = \frac{U_{\text{зм}}}{U_{d0}}; \quad \omega_1^* = \frac{\omega_1}{\omega_0}; \quad \omega_2^* = \frac{\omega_2}{\omega_0};$$

$$i_1^* = \frac{I_1}{I_{\text{кз}}}; \quad i_{\text{уп}}^* = \frac{I_{\text{уп}}}{I_{\text{кз}}}; \quad i_c^* = \frac{I_c}{I_{\text{кз}}}; \quad \tau = \frac{t}{B}; \quad p_* = Bp;$$

$$\tau_T = \frac{T}{B}; \quad \tau_2 = \frac{T_2}{B}; \quad u_1^* = \frac{u_0^*}{\tau_2}; \quad l_1 = \frac{\alpha_1 K_1}{k_E}; \quad l_3 = \frac{\alpha_3 K_1}{r};$$

$$l_4 = \frac{\alpha_4}{\tau_2 r}; \quad l_5 = \frac{\alpha_5 K_1}{k_E B}; \quad \varepsilon = \frac{\alpha_0 r}{k_E k_M}.$$

Система уравнений в относительных переменных и времени получит следующий вид:

$$(1 + l_1 + l_5 p_*) p_* \omega_1^*(p_*) + (1 + l_3 + \tau_T p_*) p_* i_1^*(p_*) +$$

$$+ l_4 i_{\text{уп}}^*(p_*) = u_1^*(p_*);$$

$$q p_* \omega_1^*(p_*) - i_1^*(p_*) + i_{\text{уп}}^*(p_*) = 0;$$

$$[(1 - q) p_* + \varepsilon] \omega_2^*(p_*) - i_{\text{уп}}^*(p_*) = -i_c^*(p_*);$$

$$\omega_1^*(p_*) - \omega_2^*(p_*) - \frac{p_*}{q(1 - q) B^2 \nu^2} i_{\text{уп}}^*(p_*) = 0$$

или в матричной форме:

$$[A] \cdot [X] = [Q],$$

где

$$[A] = \begin{bmatrix} (1 + l_1 + l_5 p_*) p_* & 0 & (1 + l_3 + \tau_T p_*) p_* & l_4 \\ q p_* & 0 & -1 & 1 \\ 0 & [(1 - q) p_* + \varepsilon] & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & -\frac{p_*}{q(1 - q) B^2 \nu^2} \end{bmatrix};$$

$$[X] = \begin{bmatrix} \omega_1^*(p_*) \\ \omega_2^*(p_*) \\ i_1^*(p_*) \\ i_{\text{уп}}^*(p_*) \end{bmatrix}; \quad [Q] = \begin{bmatrix} u_1^*(p_*) \\ 0 \\ -i_c^*(p_*) \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$q = \frac{J_1}{J_1 + J_2}; \quad \nu = \sqrt{C \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}};$$

$$\det [A] = - \left\{ \frac{\tau_T}{B^2 \nu^2} p_*^5 + \frac{1 + l_3 + \frac{l_5}{q} + \frac{\tau_T \varepsilon}{1 - q}}{B^2 \nu^2} p_*^4 + \right. \\ \left. + \left[\tau_T + \frac{1 + l_1}{q B^2 \nu^2} + \frac{1 + l_3 + \frac{l_5}{q}}{(1 - q) B^2 \nu^2} \varepsilon \right] p_*^3 + \left[1 + l_3 + l_5 + \frac{(1 + l_1) \varepsilon}{q(1 - q) B^2 \nu^2} \right] p_*^2 + \right. \\ \left. + [(1 + l_1) + (1 - q) l_4 + (1 + l_3) \varepsilon] p_* + \varepsilon l_4 \right\} = \\ = - \frac{\tau_T}{B^2 \nu^2} \left\{ p_*^5 + A_1 \Omega_0 p_*^4 + A_2 \Omega_0^2 p_*^3 + A_3 \Omega_0^3 p_*^2 + \right. \\ \left. + A_4 \Omega_0^4 p_* + \Omega_0^5 \right\}.$$

Система уравнений параметров:

$$A_1 \Omega_0 = \frac{1 + l_3 + \frac{l_5}{q}}{\tau_T} + \frac{\varepsilon}{1 - q};$$

$$A_2 \Omega_0^2 = B^2 \nu^2 + \frac{1 + l_1}{q \tau_T} + \frac{1 + l_3 + \frac{l_5}{q}}{(1 - q) \tau_T} \varepsilon;$$

$$A_3 \Omega_0^3 = \frac{B^2 \nu^2}{\tau_T} (1 + l_3 + l_5) + \frac{1 + l_1}{q(1 - q) \tau_T} \varepsilon;$$

$$A_4 \Omega_0^4 = \frac{B^2 \nu^2}{\tau_T} [(1 + l_1) + (1 - q) l_4 + (1 + l_3) \varepsilon];$$

$$\Omega_0^5 = \frac{B^2 \nu^2}{\tau_T} l_4 \varepsilon.$$

Из этой системы необходимо определить l_1, l_3, l_4, l_5 и Ω_0 для принятой величины ε и выбранной комбинации коэффициентов A_i .

Соответственно определим:

$$i_{\text{уп}}^*(p_*) = \frac{B^2 \nu^2}{\tau_T} \times \\ \times \frac{[(1 - q) p_* + \varepsilon] u_1^*(p_*) + [\tau_T p_*^3 + (1 + l_3 + l_5) p_*^2 + (1 + l_1) p_*] i_c^*(p_*)}{p_*^5 + A_1 \Omega_0 p_*^4 + A_2 \Omega_0^2 p_*^3 + A_3 \Omega_0^3 p_*^2 + A_4 \Omega_0^4 p_* + \Omega_0^5};$$

$$\omega_1^*(p_*) = \frac{B^2 \nu^2}{\tau_T} \times$$

$$\times \frac{\left[1 + \frac{(1-q)p_* + \varepsilon}{q(1-q)B^2 v^2} p_* \right] u_1^*(p_*) - [(1+l_3 + \tau_T p_*)p_* + l_4] i_c^*(p_*)}{p_*^5 + A_{11} \Omega_{01} p_*^4 + A_{21} \Omega_{01}^2 p_*^3 + A_{31} \Omega_{01}^3 p_*^2 + A_{41} \Omega_{01}^4 p_* + \Omega_{01}^5};$$

$$\omega_2^*(p_*) = \frac{B^2 v^2}{\tau_T} \times$$

$$\times \frac{u_1^*(p_*) - \left[\frac{(1+l_1 + l_5(p_*) + q(1+l_3 + \tau_T p_*))p_*^2 + l_4}{q(1-q)B^2 v^2} \right] i_c^*(p_*)}{p_*^5 + A_{11} \Omega_{01} p_*^4 + A_{21} \Omega_{01}^2 p_*^3 + A_{31} \Omega_{01}^3 p_*^2 + A_{41} \Omega_{01}^4 p_* + \Omega_{01}^5}.$$

При $p_* = 0$ и $i_c^* = \text{const}$:

$$i_{\text{уп.уст}}^* = \frac{u_1^*}{l_4}; \quad \omega_{1\text{уст}}^* = \omega_{2\text{уст}}^* = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{u_1^*}{l_4} - i_c^* \right).$$

Для получения определенного значения угловых скоростей ω_1 и ω_2 в установившемся режиме при $i_c = \text{const}$ необходимо задать

$$u_1^* = l_4 (i_c^* + \varepsilon \omega_{2\text{уст}}^*)$$

и при этом

$$i_{\text{уп.уст}}^* = i_c^* + \varepsilon \omega_{2\text{уст}}^*.$$

Кроме того, из формулы для установившихся скоростей $\omega_{1\text{уст}}^*$ и $\omega_{2\text{уст}}^*$ следует, что при $u_1^* \neq l_4 i_c^*$ и $\varepsilon = 0$ модуль установившейся скорости стремится к бесконечности, т.е. линейная система статически неустойчива даже при постоянстве $i_{\text{уп.уст}}^*$. Если же $u_1^* = l_4 i_c^*$, то для $\omega_{1\text{уст}}^* = \omega_{2\text{уст}}^*$ получаем при $\varepsilon = 0$ неопределенность типа «ноль на ноль».

Рассмотрим подробнее случай $u_1^* = l_4 i_c^*$ при $\varepsilon = 0$. В этом случае

$$\det [A] = - \frac{\tau_T}{B^2 v^2} p_* \times$$

$$\times \{ p_*^4 + A_{11} \Omega_{01} p_*^3 + A_{21} \Omega_{01}^2 p_*^2 + A_{31} \Omega_{01} p_* + \Omega_{01}^4 \},$$

где

$$A_{11} \Omega_{01} = \frac{1 + l_3 + \frac{l_5}{q}}{\tau_T};$$

$$A_{21} \Omega_{01}^2 = B^2 v^2 + \frac{1 + l_1}{q \tau_T};$$

$$A_{31} \Omega_{01}^3 = \frac{B^2 v^2}{\tau_T} (1 + l_3 + l_5);$$

$$\Omega_{01}^4 = \frac{B^2 v^2}{\tau_T} [(1 + l_1) + (1 - q) l_4].$$

Эта система уравнений параметров совместна. Например, при $l_1 = -1$

$$\Omega_{01} = \sqrt{\frac{B^2 v^2}{A_{21}}}; \quad l_5 = \frac{q \tau_T}{1 - q} \left(A_{11} - \frac{A_{31}}{A_{21}} \right) \Omega_{01};$$

$$l_3 = \frac{A_{31}}{A_{21}} \Omega_{01} \tau_T - (1 + l_5); \quad l_4 = \frac{\Omega_{01}^4 \tau_T}{(1 - q) B^2 v^2}.$$

При $u_1^* = l_4 i_c^*$ и $\varepsilon = 0$

$$p_* i_{\text{уп}}^*(p_*) = \frac{B^2 v^2}{\tau_T} \times$$

$$\times \frac{\left\{ \tau_T p_*^3 + (1 + l_3 + l_5) p_*^2 + [(1 + l_1) + (1 - q) l_4] p_* \right\} i_c^*(p_*)}{p_*^4 + A_{11} \Omega_{01} p_*^3 + A_{21} \Omega_{01}^2 p_*^2 + A_{31} \Omega_{01}^3 p_* + \Omega_{01}^4}.$$

В системе замкнутого управления — единственное возможное значение при $t \rightarrow \infty$ ($p_* = 0$) $i_{\text{уп.уст}}^* = i_c^*$; этому не противоречит и равное нулю значение производной упругого тока $i_{\text{уп}}^*$ при $p_* = 0$.

Иначе обстоит дело с ω_2^* ; при тех же условиях $u_1^* = l_4 i_c^*$ и $\varepsilon = 0$

$$p_* \omega_2^*(p_*) = - \frac{1}{q(1 - q) \tau_T} \times$$

$$\times \frac{[(1 + l_1 + l_3 p_*) + q(1 + l_3 + \tau_T p_*)] p_*^2 i_c^*(p_*)}{p_*^4 + A_{11} \Omega_{01} p_*^3 + A_{21} \Omega_{01}^2 p_*^2 + A_{31} \Omega_{01}^3 p_* + \Omega_{01}^4}.$$

При $t \rightarrow \infty$ ($p_* = 0$) производная скорости ω_2^* равна нулю, а при интегрировании появляется неопределенная постоянная составляющая, и система будет устойчивой не относительно скорости ω_2 (то же самое и в отношении скорости ω_1), а относительно производной этой скорости. Отклонения же скорости в установившемся режиме могут принимать различные значения. Такая система называется нейтрально устойчивой [2].

Значения $\omega_{1\text{уст}}^* = \omega_{2\text{уст}}^*$ определяются особенностями динамического процесса и зависят, например, от значений постоянной времени фильтра на входе сигнала u_1^* , в то время как $i_{\text{уп.уст}}^*$ от этого фактора не зависит.

При $\varepsilon > 0$ значения $\omega_{2\text{уст}}^* = \omega_{1\text{уст}}^*$ определяются однозначно сигналом u_1^* при данном значении ε .

Следует заметить, что если расчет параметров регулятора ДЭМС стабилизации момента в упругом звене по формулам для системы четвертого порядка элементарен, то расчет по формулам системы уравнений параметров для пятого порядка при $\varepsilon > 0$ требует особого подхода (см. приложение).

Структурная схема моделирования ДЭМС стабилизации момента в упругом звене приведена на рис. 2. На входе установлено апериодическое

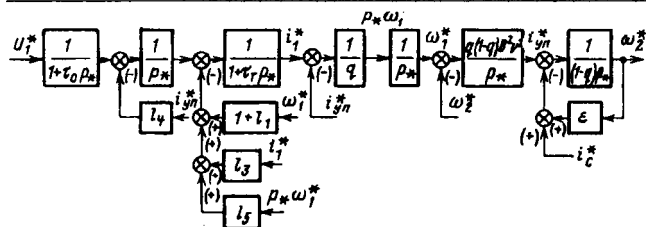


Рис. 2. Структурная схема моделирования ДЭМС стабилизации момента в упругом звене, с входным фильтром, в относительных значениях величин и времени

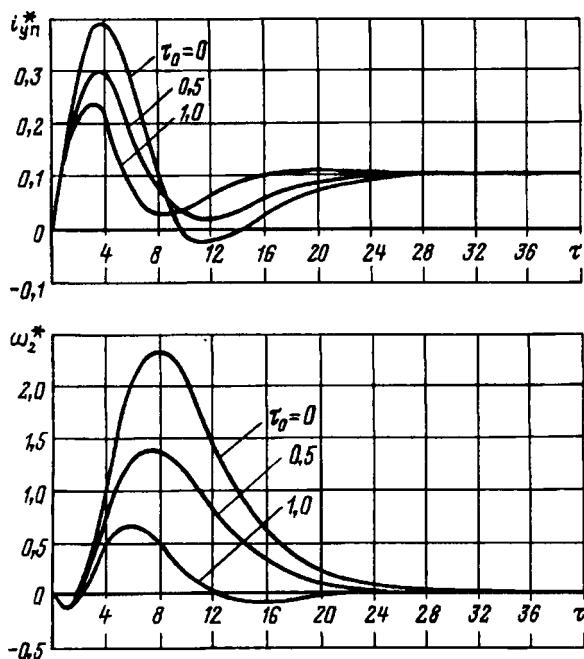


Рис. 3. Переходные процессы $i_{yn}^*(\tau)$ и $\omega_2^*(\tau)$ при вариации τ_0 ($B^2 \nu^2 = 4$; $q = 0,5$; $\tau_T = 0,5$; $i_c^* = 0,1$; $\varepsilon = 0,005$; $u_1^* = l_4 i_c^*$)

звено с постоянной времени τ_0 . Это позволяет рассмотреть влияние различных вариантов формирования задающего сигнала u_1^* на переходные характеристики регулируемых координат системы.

Часть результатов цифрового моделирования ДЭМС стабилизации момента в упругом звене для объекта с параметрами $B^2 \nu^2 = 4$; $q = 0,5$; $\tau_T = 0,5$ и с параметрами обратных связей, определенными из системы уравнений параметров пятого порядка, $l_1 = -1,3632$; $l_3 = -1,9404$; $l_4 = 0,8188$; $l_5 = 1,1011$ приведена на рис. 3—5.

На рис. 3 представлены переходные процессы $i_{yn}^*(\tau)$ и $\omega_2^*(\tau)$ при $i_c^* = 0,1$; $\varepsilon = 0,005$ и $u_1^* = l_4 i_c^*$ для различных значений постоянной времени τ_0 входного фильтра. Установка этого фильтра позволяет снизить максимальные значения i_{yn}^* и ω_2^* в переходном процессе.

На рис. 4 представлены переходные процессы $i_{yn}^*(\tau)$ и $\omega_2^*(\tau)$ при $i_c^* = 0,1$; $\varepsilon = 0$ и $u_1^* = l_4 i_c^*$ для двух значений постоянной времени τ_0 входного фильтра. В этих условиях, когда $\varepsilon = 0$, устано-

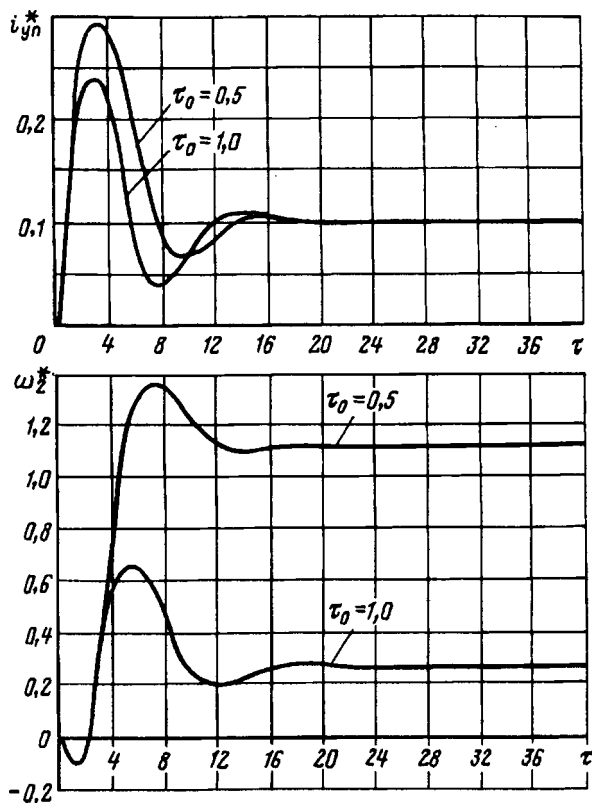


Рис. 4. Переходные процессы $i_{yn}^*(\tau)$ и $\omega_2^*(\tau)$ при вариации τ_0 ($B^2 \nu^2 = 4$; $q = 0,5$; $\tau_T = 0,5$; $i_c^* = 0,1$; $\varepsilon = 0$; $u_1^* = l_4 i_c^*$)

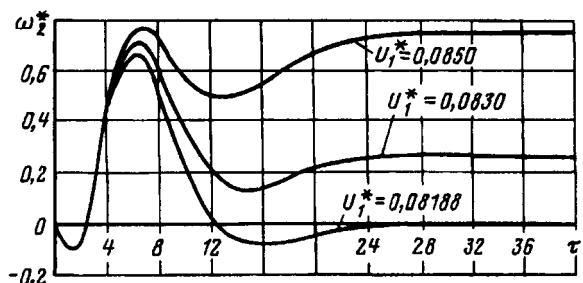


Рис. 5. Переходные процессы $\omega_2^*(\tau)$ при вариации u_1^* ($B^2 \nu^2 = 4$; $q = 0,5$; $\tau_T = 0,5$; $i_c^* = 0,1$; $\varepsilon = 0,005$; $\tau_0 = 1$)

вившиеся значения $\omega_{1уст}^* = \omega_{2уст}^*$ при $i_{уп.уст}^*$ существенно зависят от постоянной времени τ_0 фильтра.

На рис. 5 представлены переходные процессы $\omega_2^*(\tau)$ при $i_c^* = 0,1$; $\varepsilon = 0,005$ и вариации u_1^* ; постоянная времени входного фильтра $\tau_0 = 1$. Установившиеся значения $\omega_{1уст}^* = \omega_{2уст}^*$ однозначно определяются значением u_1^* при принятых i_c^* и ε . Ниже приведены результаты расчета и цифрового моделирования для трех значений u_1^* при $i_c^* = 0,1$ и $\varepsilon = 0,005$:

u_1^*	$\max i_{yn}^*$	$i_{yn.уст}^*$	$\max \omega_2^*$	$\omega_{2уст}^*$	$\max \omega_1^*$	$\omega_{1уст}^*$	$\max i_1^*$	$i_{1уст}^*$
0,08188	0,2445	0,1000	0,6667	0	0,6224	0	0,3532	0,1000
0,0830	0,2465	0,1014	0,7077	0,2738	0,6657	0,2738	0,3577	0,1014
0,0850	0,2500	0,1038	0,7809	0,7623	0,7429	0,7623	0,3656	0,1038

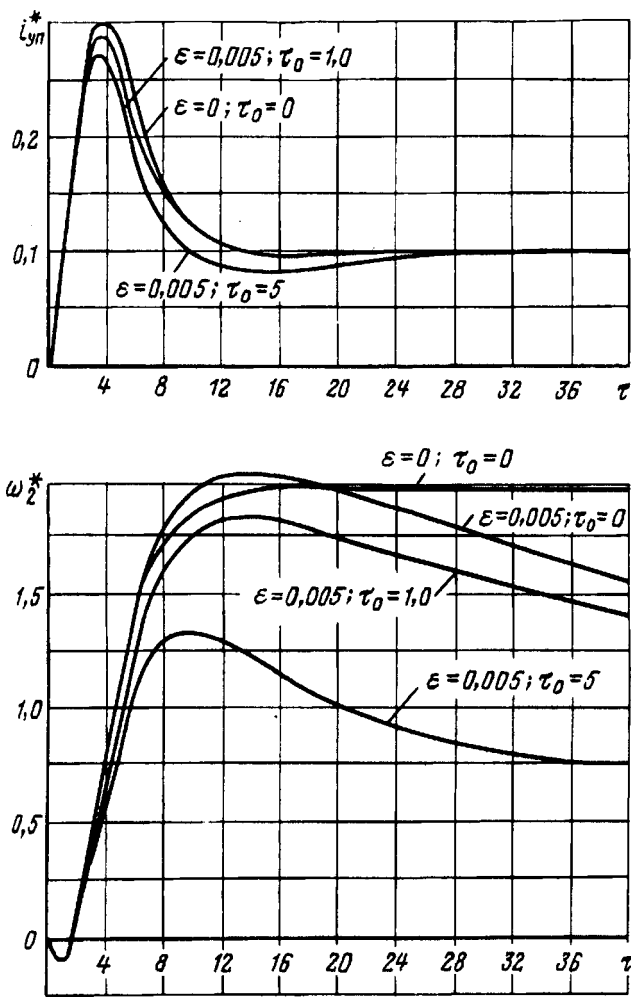


Рис. 6. Переходные процессы $i_{yn}^*(\tau)$ и $\omega_2^*(\tau)$ при различных значениях ε и τ_0 с коэффициентами обратных связей, определенными из системы уравнений параметров четвертого порядка ($B^2 \nu^2 = 4$; $q = 0,5$; $\tau_T = 0,5$; $i_c^* = 0,1$; $u_1^* = l_4 i_c^*$)

Приложение. Рассмотрим пример расчета параметров по формулам системы уравнений параметров четвертого порядка.

Дано $q = 0,5$; $\tau_T = 0,5$; $B^2 \nu^2 = 4$; $\varepsilon = 0$; $i_c^* = 0,1$.

Выбираем комбинацию коэффициентов формы A_i , соответствующую биномиальному распределению корней характеристического уравнения четвертого порядка: $A_{11} = 4$; $A_{21} = 6$; $A_{31} = 4$. Принимаем $l_1 = -1$. Тогда

$$\Omega_{01}^2 = \frac{B^2 \nu^2}{A_{21}} = 0,66667; \quad \Omega_{01} = 0,81650;$$

$$l_5 = \frac{q \tau_T}{1-q} \left(A_{11} - \frac{A_{31}}{A_{21}} \right) \Omega_{01} = 1,3608;$$

$$l_3 = \frac{A_{31}}{A_{21}} \Omega_{01} \tau_T - (1 + l_5) = -2,0887;$$

$$l_4 = \frac{\Omega_{01}^4 \tau_T}{(1-q) B^2 \nu^2} = 0,11111.$$

Результаты цифрового моделирования ДЭМС с указанными параметрами при $u_1^* = l_4 i_c^*$ и $\varepsilon = 0$, а также при отсутствии входного фильтра приведены на рис. 6. На этом же рисунке показаны процессы при тех же параметрах обратных связей, но при $\varepsilon = 0,005$ и вариации τ_0 . Из рис. 6 следует, что выбор коэффициентов $A_{11} = 4$; $A_{21} = 6$; $A_{31} = 4$ нельзя признать удачным: при $\varepsilon = 0$ слишком велико значение $\omega_{2уст}^*$, а при $\varepsilon = 0,005$ переходные процессы $\omega_2^*(\tau)$ очень затянуты.

Рассмотрим пример расчета параметров по формулам системы уравнений параметров пятого порядка при $\varepsilon > 0$.

Дано: $q = 0,5$; $\tau_T = 0,5$; $B^2 \nu^2 = 4$; $\varepsilon = 0,005$.

При малом значении ε предлагается пренебречь в первом приближении слагаемыми с ε в формулах системы уравнений параметров, а связанную с этим погрешность δ_i учесть позже.

Получаем:

$$A_1' \Omega_0 = \frac{1 + l_3 + l_5/q}{\tau_T}; \quad \text{погрешность } \delta_1 = \frac{\varepsilon}{1-q}; \quad (1)$$

$$A_2' \Omega_0^2 = B^2 \nu^2 + \frac{1 + l_1}{q \tau_T}; \quad \text{погрешность } \delta_2 = \frac{1 + l_3 + l_5/q}{(1-q) \tau_T} \varepsilon; \quad (2)$$

$$A_3' \Omega_0^3 = \frac{B^2 \nu^2}{\tau_T} (1 + l_3 + l_5); \quad \text{погрешность } \delta_3 = \frac{(1 + l_1) \varepsilon}{q(1-q)}; \quad (3)$$

$$A_4' \Omega_0^4 = \frac{B^2 \nu^2}{\tau_T} [(1 + l_1) + (1 - q) l_4];$$

$$\text{погрешность } \delta_4 = \frac{B^2 \nu^2}{\tau_T} (1 + l_3) \varepsilon; \quad (4)$$

$$\Omega_0^5 = \frac{B^2 \nu^2}{\tau_T} l_4 \varepsilon. \quad (5)$$

Из (1) и (3)

$$l_5 = \frac{q}{1-q} \Omega_0 \tau_T \left(A_1' - A_3' \frac{\Omega_0^2}{B^2 \nu^2} \right);$$

$$l_3 = \frac{A_3' \Omega_0^3}{B^2 \nu^2} \tau_T - (1 + l_5).$$

Из (2) и (4)

$$l_1 = (A_2' \Omega_0^2 - B^2 \nu^2) q \tau_T - 1;$$

$$l_4 = \left[\frac{A_4' \Omega_0^4 \tau_T}{B^2 \nu^2} - (1 + l_1) \right] \frac{1}{1-q}.$$

Из (5)

$$l_4 = \frac{\Omega_0^5 \tau_T}{B^2 \nu^2 \varepsilon}.$$

Приравниваем правые части двух последних

формулы для l_4 и, преобразовав, получаем:

$$\Omega_0^5 - \frac{A_1' \varepsilon}{1-q} \Omega_0^4 + \frac{A_2' B^2 v^2 q \varepsilon}{1-q} \Omega_0^3 - \frac{(B^2 v^2)^2 q \varepsilon}{1-q} = 0.$$

Задаемся комбинацией A_i , соответствующей биномиальному распределению корней характеристического уравнения пятого порядка:

$$A_1=5; A_2=10; A_3=10; A_4=5.$$

Учитывая ориентировочно влияние погрешностей δ_i , принимаем (хотя возможен повторный расчет): $A_1'=5$; $A_2'=10$; $A_3'=10$; $A_4'=5,7$. После подстановки параметров объекта и коэффициентов A_i' получим уравнение для определения Ω_0 :

$$\Omega_0^5 - 0,057 \Omega_0^4 + 0,2 \Omega_0^3 - 0,08 = 0;$$

решение этого уравнения: $\Omega_0 = 0,504715$.

По приведенным выше формулам находим:

$$l_5 = 1,1011; l_3 = -1,9404; l_1 = -1,3632; l_4 = 0,8188.$$

Затем по формуле

$$A_i' \Omega_0^i + \delta_i = A_i'' \Omega_0^i, \quad i = 1, \dots, 4$$

получаем:

$$A_1' \Omega_0 = 2,5236; \text{ погрешность } \delta_1 = 0,010, \text{ т.е. } A_1'' = 5,02;$$

$$A_2' \Omega_0^2 = 2,5474; \text{ погрешность } \delta_2 = 0,0252, \text{ т.е. } A_2'' = 10,1;$$

$$A_3' \Omega_0^3 = 1,2857; \text{ погрешность } \delta_3 = -0,0073, \text{ т.е. } A_3'' = 10,0;$$

$$A_4' \Omega_0^4 = 0,3699; \text{ погрешность } \delta_4 = -0,0376, \text{ т.е. } A_4'' = 5,12.$$

Полученные коэффициенты A_i'' близки к исходным A_i и соответствуют принятому биномиальному распределению корней уравнения пятого порядка.

Результаты цифрового моделирования ДЭМС с этими параметрами приведены на рис. 3–5.

Выводы. Синтез ДЭМС стабилизации момента в упругом звене следует проводить, учитывая одновременность приложения управляющего и возмущающего воздействий, а также диссипативную составляющую момента на валу второй

массы. Такой подход позволяет получить более полное представление о переходных процессах регулируемых координат ДЭМС, а также избежать режима нейтральной устойчивости ДЭМС.

Для ограничения экстремальных значений регулируемых координат и улучшения формы переходных процессов ДЭМС предложена установка входного фильтра, постоянная времени которого выбирается с учетом одновременности управляющего и возмущающего воздействий.

Диссипативная составляющая момента на валу второй массы определяет установившиеся значения скоростей при выбранном сигнале u_1^* :

$$\omega_{2\text{уст}}^* = \omega_{1\text{уст}}^* = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{u_1^*}{l_4} - i_c^* \right)$$

и значение момента в упругом звене:

$$i_{\text{уп.уст}}^* i_c^* + \varepsilon \omega_{2\text{уст}}^*.$$

Параметры обратных связей ДЭМС следует определять по предложенной методике на базе характеристического уравнения пятого порядка, т.е. при $\varepsilon > 0$. Отдельным и существенным является вопрос об экспериментальном определении ε (т.е. α_6) для конкретных объектов и условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бургин Б.Ш. Астатическая ДЭМС стабилизации скорости с обратными связями по угловой скорости и ускорению двигателя. — Научный вестник НГТУ, Новосибирск: НГТУ, 1995. № 1.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1975.

[08.10.96]

Автор: Бургин Борис Шимельевич окончил Ленинградский технологический институт в 1950 г. В 1974 г. в Томском политехническом институте защитил докторскую диссертацию «Основы теории автоматизированного электропривода черпающего комплекса драг». Профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского государственного технического университета.

К теории доменной структуры аморфного провода на основе кобальта

УСОВ Н.А., АНТОНОВ А.С., ДЫХНЕ А.М., ЛАГАРЬКОВ А.Н.

Показано, что намагниченность во внутреннем ядре аморфного провода с малым значением константы магнитострикции, обычно направленная параллельно оси провода, может плавно разворачиваться вблизи его торцов под влиянием размагничивающего поля поверхностных магнитных зарядов с тем, чтобы уменьшить плотность поверхностных магнитных зарядов на торце провода. В результате продольная компонента намагниченности провода плавно уменьшается вблизи его торцов. Характерная критическая длина, на которой происходит уменьшение продольной компоненты, на несколько порядков больше диаметра провода. Для провода с длиной, меньше критической, остаточная намагниченность есть монотонно возрастающая функция длины провода.

Ключевые слова: аморфный провод, магнитострикция, доменная структура

1. Введение. Свойства магнитомягких аморфных проводов и лент, приготовленных быстрой закалкой из расплава, привлекают в последнее время большое внимание в связи с такими их уникальными характеристиками, как магнитная бистабильность, которая наблюдается в основном в аморфных проводах на основе железа, и эффект Маттеучи (см. обзоры [1–3] и указанные там ссылки). Кроме того, в аморфных проводах на основе кобальта, с близким к нулю значением константы магнитострикции, недавно открыт эффект гигантского магнитного комплексного сопротивления (ГМКС) [4–6]. Большая чувствительность ГМКС к внешнему магнитному полю делает этот эффект весьма интересным при конструировании новых магнитных сенсоров и головок магнитной записи. Как показывают теоретические оценки, большая чувствительность ГМКС связана скорее всего с перестройкой чрезвычайно тонкой и подвижной доменной структуры аморфного провода или ленты под действием слабого внешнего магнитного поля.

Магнитные свойства аморфных проводов на основе железа и кобальта описывают обычно в рамках модели, предполагающей наличие в аморфном проводе двух областей — кора и оболочки, с различным направлением легких осей анизотропии [7, 8]. В случае аморфного провода на основе кобальта с отрицательным значением константы магнитострикции совокупность экспериментальных данных может быть удовлетворительно объяснена, если предположить, что

It is shown, that the bamboo domain structure in outer shell of the wire may exist due to small disturbances in the axial symmetry of the wire. The inner core magnetization of amorphous wire with small enough value of the anisotropy constant may be twisted near the wire ends due to influence of the demagnetizing field of the surface magnetic charges. As a result, the longitudinal component of the wire magnetization reduces slowly near the wire ends. The critical length of the magnetization reduction is several orders larger than the wire radius. For a wire with length lower than the critical one the remanent wire magnetization is the increasing function of the wire length.

Key words: amorphous wire, magnetostriction, domain structure

вблизи центра провода имеется кор, однородно намагниченный вдоль оси провода, а во внешней оболочке намагниченность направлена азимутально. В случае же аморфного провода на основе железа с положительным значением константы магнитострикции намагниченность во внешней оболочке провода имеет радиальное направление. Обычно предполагается также, что в аморфном проводе энергия магнитной кристаллографической анизотропии отсутствует и распределение легких осей в образце определяется распределением закалочных остаточных напряжений [1, 2, 8]. Последовательный теоретический анализ этих представлений до сих пор отсутствовал.

В данной работе мы рассматриваем вопрос о том, какой тип распределения закалочных остаточных напряжений по сечению образца может приводить к наличию в аморфном проводе на основе кобальта с отрицательным значением магнитострикции однородно намагниченного кора и оболочки с азимутальным направлением намагниченности. Далее мы изучаем влияние внешнего магнитного поля на распределение намагниченности в аморфном проводе и рассматриваем экспериментально обнаруженный размерный эффект, т.е. зависимость распределения намагниченности в аморфном проводе от длины образца. Полученные результаты сравниваются с соответствующими экспериментальными данными.

2. Структура 90°-й доменной границы, разделяющей кор и оболочку провода. В настоящее

время считается [1–3], что в аморфных магнетиках энергия магнитокристаллографической анизотропии мала или вовсе отсутствует, так что наблюдаемая на опыте магнитная анизотропия аморфных проводов связана в основном с магнитоупругими воздействиями. Последние возникают за счет наличия в образце остаточных закалочных напряжений. В соответствии с этой идеей в данной работе мы постулируем, что в достаточно длинном макроскопически однородном отрезке аморфного провода плотность энергии магнитоупругих взаимодействий может быть записана в виде [9]

$$w_{m-el}^{(1)} = -\frac{3}{2}\lambda_s(\sigma_{\rho\rho}^{(q)}\alpha_\rho^2 + \sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}\alpha_\varphi^2 + \sigma_{zz}^{(q)}\alpha_z^2), \quad (1)$$

где λ_s — константа магнестрикции; α_i — компоненты единичного вектора намагниченности, заданные в цилиндрической системе координат (ρ, φ, z) ; $\sigma_{ii}^{(q)}$ — компоненты соответствующего тензора напряжений.

В силу аксиальной симметрии провода недиагональные компоненты тензора напряжений отсутствуют, а диагональные компоненты считаются зависящими лишь от приведенной координаты $x=\rho/R$, где R — радиус провода.

Несмотря на предпринятые попытки рассчитать компоненты тензора закалочных напряжений исходя из уравнений теории термоупругости [10, 11], проблема, по нашему мнению, до сих пор остается нерешенной. Для того чтобы исследовать качественно роль закалочных напряжений и объяснить экспериментальные данные, представляется разумным принять предположение [12], что поведение диагональных компонент тензора закалочных напряжений в аморфном проводе близко к тому, как наблюдается экспериментально в длинных металлических стержнях, приготовленных закалкой из жидкого состояния. Как показывает эксперимент [12], в закаленном железном стержне диагональные компоненты $\sigma_{ii}^{(q)}$ являются монотонно убывающими функциями приведенного радиуса x , причем компонента $\sigma_{\rho\rho}^{(q)}$ всюду положительна, а компоненты $\sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}$ и $\sigma_{zz}^{(q)}$ положительны вблизи центра стержня, но затем меняют знак и становятся отрицательными вблизи его поверхности. Подобное поведение компонент тензора закалочных напряжений предполагается далее и для аморфного провода, как это схематически показано на рис. 1.

Заметим, что соотношение (1) есть квадратичная форма по отношению к компонентам единичного вектора намагниченности. В данной работе мы ограничиваемся случаем провода с отрицательной константой магнестрикции, $\lambda_s < 0$. Легко видеть, что в этом случае минимум квадратичной формы (1) соответствует наимень-

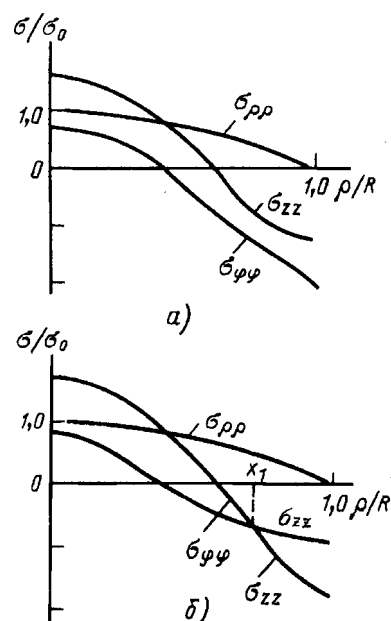


Рис. 1. Предполагаемая радиальная зависимость компонент тензора закалочных напряжений аморфного провода на основе кобальта: а — однородно намагниченный кор отсутствует; б — приведенный радиус кора равен $x_1 = R_1/R$

шей из компонент $\sigma_{ii}^{(q)}$. Следовательно, направление легких осей анизотропии внутри аморфного провода определяется отношением друг к другу величин компонент $\sigma_{ii}^{(q)}$. Допустим, что во всем интервале радиусов $0 < \rho < R$ выполняется неравенство $\sigma_{\varphi\varphi}^{(q)} < \sigma_{\rho\rho}^{(q)}, \sigma_{zz}^{(q)}$. Тогда внутри провода легкая ось анизотропии направлена азимутально и наименьшим по энергии состоянием будет состояние с $\alpha_\varphi = +1$ или $\alpha_\varphi = -1$ всюду, за исключением малой области вблизи центра провода. При этом кор, намагниченный в среднем вдоль оси провода, практически отсутствует и остаточная намагниченность провода будет равна нулю. Более точно, α_z компонента в рассматриваемой ситуации отлична от нуля лишь в малой области $\rho < \delta$ вблизи центра провода, где $\delta = \sqrt{C/K_e}$ — длина порядка ширины доменной границы, C — обменная константа, K_e — эффективная константа анизотропии. Такое поведение вектора намагниченности исключает особенность при $\rho = 0$, но при этом приводит к пренебрежимо малому вкладу в продольную намагниченность достаточно толстого провода диаметром $D \approx 100$ мкм. Рассмотренная ситуация, показанная качественно на рис. 1, а, не является типичной для аморфных проводов на основе кобальта (изготавливается, в частности, фирмой Unitika), для которых экспериментальные измерения выявили значительную остаточную намагниченность, направленную вдоль оси провода [8]. Этот факт можно объяснить, пред-

положив что вблизи центра провода легкая ось анизотропии направлена вдоль оси провода. Тогда из уравнения (1) следует, что вблизи центра провода должно выполняться неравенство $\sigma_{zz}^{(q)} < \sigma_{\rho\rho}^{(q)}$, $\sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}$, в то время как предыдущее неравенство выполняется вблизи поверхности провода, в области внешней оболочки (см. рис. 1,б).

Для определенности далее в оценках мы используем следующее модельное выражение для компонент тензора остаточных напряжений:

$$\sigma_{\rho\rho}^{(q)} = \sigma_0(1 - x^2); \quad \sigma_{\varphi\varphi}^{(q)} = \sigma_0(1 - 3x^2);$$

$$\sigma_{zz}^{(q)} = \sigma_0(a_1 - a_2 x^2), \quad (2)$$

где σ_0 — характерная амплитуда закалочных напряжений.

Предполагается, что параметры a_i удовлетворяют неравенствам $0 < a_1 < 1$ и $0 < a_2 < a_1 + 2$. Это означает, что $\sigma_{zz}^{(q)}(0) < \sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}(0)$, но $\sigma_{zz}^{(q)}(1) > \sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}(1)$. В таком случае график функции $\sigma_{zz}^{(q)}(x)$ пересекает график функции $\sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}(x)$ в некоторой точке $x_1 = R_1/R < 1$. Далее мы покажем, что R_1 есть радиус внутреннего кора, намагниченного вдоль оси провода; при $\rho > R_1$ намагниченность направлена азимутально. Конечно, распределение намагниченности внутри провода не может измениться скачком, поэтому области кора и оболочки разделят 90°-я доменная стенка, расположенная, как будет показано ниже, при $\rho = R_1$.

С учетом аксиальной симметрии как провода, так и распределения остаточных закалочных напряжений распределение намагниченности в аморфном проводе с отрицательным значением константы магнитострикции можно записать в виде

$$\alpha_\rho = 0; \quad \alpha_\varphi = \sin \theta(\rho); \quad \alpha_z = \cos \theta(\rho), \quad (3)$$

где $\theta(\rho)$ — функция, подлежащая определению. Тогда полная энергия провода есть сумма обменной энергии и энергии магнитоупругих взаимодействий:

$$W = W_{exc} + W_{m-el},$$

$$W_{exc} = \pi L_z C \int_0^R \rho d\rho \left[\left(\frac{d\theta}{d\rho} \right)^2 + \frac{\sin^2 \theta}{\rho^2} \right]; \quad (4)$$

$$W_{m-el} = \pi L_z \frac{K_e}{\sigma_0} \int_0^R \rho d\rho [\sigma_{\varphi\varphi}^{(q)} \sin^2 \theta + \sigma_{zz}^{(q)} \cos^2 \theta], \quad (4a)$$

где $K_e = 3 |\lambda_s| \sigma_0$ — эффективная константа анизотропии и L_z — длина провода. Заметим, что для распределения намагниченности вида (3) плотность как объемных, так и поверхностных магнитных зарядов равна нулю, так что магнитостатическая энергия провода исчезает.

Получим сначала простую оценку для по-

ложения R_w и для толщины рассматриваемой 90°-й доменной границы. Легко видеть, что плотность обменной энергии имеет заметную величину лишь в малом интервале вблизи R_w , где функция $\theta(\rho)$ резко меняется. Следовательно, положение доменной границы в основном определяется магнитоупругой энергией. Последнюю можно приближенно записать в виде

$$W_{m-str} = \pi L_z \frac{K_e}{\sigma_0} \left\{ \int_0^{R_w} \rho d\rho \sigma_{zz}^{(q)} + \int_{R_w}^{R_w+\delta} \rho d\rho [\sigma_{zz}^{(q)} - \sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}] \cos^2 \theta + \int_{R_w+\delta}^R \rho d\rho \sigma_{\varphi\varphi}^{(q)} \right\}. \quad (5)$$

Так как $\delta \ll R_w$, то второй член в скобках в (5) может быть в первом приближении опущен. Тогда, минимизируя магнитоупругую энергию по отношению к R_w , получаем приближенное уравнение для определения равновесного положения доменной стенки:

$$\sigma_{zz}^{(q)}(R_w) = \sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}(R_w), \quad (6)$$

откуда следует, что $R_w \approx R_1$.

Чтобы оценить равновесную ширину доменной границы, необходимо теперь минимизировать сумму обменной энергии и той части магнитоупругой энергии, которая определяется вторым членом в скобках в (5). Это дает

$$\Delta W = W_{exc} + \Delta W_{m-str} \approx \frac{\pi^3}{4} C L_z \frac{R_1}{\delta} + \frac{\pi}{2\sigma_0} L_z K_e \delta^2 R_1 \times$$

$$\times \left[\frac{d}{d\rho} (\sigma_{zz}^{(q)} - \sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}) \right]_{\rho=R_1}. \quad (7)$$

Минимизируя (7) по отношению к R_w , получаем для равновесной толщины и удельной энергии 90°-й доменной границы следующие выражения:

$$\delta = \left(\frac{\pi^2}{4} C \sigma_0 / K_e \left[\frac{d}{d\rho} (\sigma_{zz}^{(q)} - \sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}) \right]_{\rho=R_1} \right)^{1/3};$$

$$\gamma = \frac{\Delta W}{2\pi R_1 L_z} = \frac{3\pi^2}{16} \frac{C}{\delta}. \quad (8)$$

С учетом (2) находим

$$R_1 \left[\frac{d}{d\rho} (\sigma_{zz}^{(q)} - \sigma_{\varphi\varphi}^{(q)}) \right]_{\rho=R_1} = 2(1 - a_1) \sigma_0,$$

так что в рассматриваемом случае $\delta \approx (CR/K_e)^{1/3}$ и $\gamma \approx (C^2 K_e/R)^{1/3}$. Полагая $C = 10^{-6}$ эрг/см, $R = 6 \cdot 10^{-3}$ см и $K_e = (100 \div 500)$ эрг/см³ [8], можно оценить указанные величины как $\delta \approx (2 \div 4) \cdot 10^{-4}$ см и $\gamma \approx 10^{-2}$ эрг/см².

Получим теперь точное уравнение, определяющее структуру 90°-й доменной границы, при

этом учтем наличие однородного внешнего магнитного поля, параллельного оси провода. Вклад энергии Зеемана в полную энергию провода (4) имеет вид

$$W_z = -2\pi L_z M_s H_0 \int_0^R \rho d\rho \cos \theta(\rho), \quad (9)$$

где M_s — намагниченность насыщения и H_0 — амплитуда внешнего магнитного поля. Минимизируя сумму энергий (4) и (9) по отношению к функции (ρ) , получаем уравнение

$$-\frac{1}{x} \frac{d}{dx} \left(x \frac{d\theta}{dx} \right) + \left[\frac{1}{x^2} + p \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^{(q)} - \sigma_{zz}^{(q)}}{\sigma_0} \right] \times \\ \times \sin \theta \cos \theta + h_0 \sin \theta = 0, \quad (10)$$

с граничным условием $d\theta/dx=0$ при $x=1$. В уравнении (10) обозначим

$$p = \frac{K_e R^2}{C}, \quad h_0 = \frac{H_0 M_s R^2}{C}. \quad (10a)$$

Решение уравнения (10), конечное при $x=0$, описывает структуру 90°-й доменной границы, разделяющей кор и оболочку аморфного провода на основе кобальта, при различных значениях амплитуды внешнего магнитного поля. Используя выше значения величин R , C и K_e , легко видеть, что параметр $p \approx 10^3$ весьма велик для типичного провода на основе кобальта. По этой причине метод Рунте—Кутта, обычно используемый для численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, в данном случае неприменим.

Чтобы проинтегрировать численно уравнение (10) при заданных параметрах задачи p и h_0 разбиваем цилиндрический провод на большое число ($N \approx 10^2$) тонких полых соосных цилиндров, предполагая, что в пределах i -го цилиндра, $(i-1)/N \leq x \leq i/N$, единичный вектор намагниченности остается постоянным, $\vec{a}_i = (0, \alpha_{\varphi,i}, \alpha_{z,i})$. Затем используем численную процедуру, которая имитирует эволюцию по времени некоторого начального микромагнитного состояния в соответствии с уравнением типа Ландау—Лифшица—Гильберта [13, 14]. Детали этих вычислений будут изложены в другом месте; здесь подробно обсудим их результаты, которые показаны на рис. 2. В этих вычислениях эффективная константа анизотропии и намагниченность насыщения провода полагались равными $K_e = 250$ эрг/см³ и $M_s = 500$ г.

В отсутствие внешнего магнитного поля (см. кривую 3 на рис. 2) распределение намагниченности в аморфном проводе представляет собой 90°-ю доменную границу, толщину которой мы оценили выше, исходя из качественных соображений. Далее, как видно на рис. 2, для положительных значений амплитуды внешнего маг-

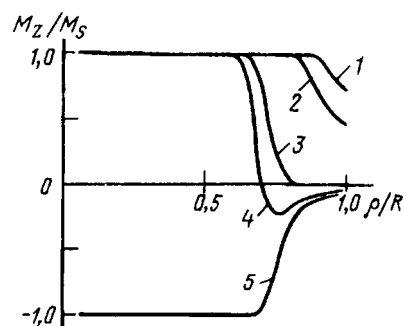


Рис. 2. Структура 90°-й доменной границы, разделяющей кор и внешнюю оболочку аморфного провода на основе кобальта, при различных значениях амплитуды внешнего магнитного поля: 1) $H_0 = 0,2$ Э; 2) $H_0 = 0,1$ Э; 3) $H_0 = 0$; 4) $H_0 = -0,028$ Э; 5) $H_0 = -0,032$ Э. Радиус провода $R = 6 \cdot 10^{-3}$ см, эффективная константа анизотропии $K_e = 250$ эрг/см³. Компонента тензора остаточных напряжений σ_{zz} дается уравнением (2) с $a_1 = 0,5$; $a_2 = 2,0$

нитного поля, когда его направление совпадает с направлением намагниченности внутреннего кора, область кора быстро увеличивается при увеличении амплитуды поля (см. кривые 1 и 2 на рис. 2). С другой стороны, если внешнее магнитное поле направлено противоположно намагниченности кора, его радиус уменьшается (кривая 4). Более того, при некотором критическом значении поля распределение намагниченности в проводе становится неустойчивым и направление намагниченности кора меняется на обратное. Так как провод считается достаточно длинным, можно предположить, что обнаруженная неустойчивость аналогична неустойчивости типа моды curling, возникающей в бесконечном круговом цилиндре при соответствующем значении обратного магнитного поля [15]. Следует отметить, что провод конечной длины перемагничивается, скорее всего, за счет сложных процессов перестройки намагниченности вблизи его торцов. Очевидно, что на эти процессы большое внимание должно оказывать размагничивающее поле, существующее вблизи торцов провода (см. четвертый раздел данной работы).

3. Бамбуковая доменная структура внешней оболочки провода. В предыдущем пункте мы показали, что в достаточно длинном аксиально симметричном аморфном проводе с отрицательным значением константы магнитострикции распределение намагниченности, соответствующее 90°-й доменной границе, которая разделяет кор и оболочку, описывается уравнением (3); при этом плотность объемных и поверхностных магнитных зарядов в проводе равна нулю. Следовательно, магнитостатическая энергия провода также равна нулю и причина для образования какой-либо доменной структуры вдоль провода отсутствует. Тем не менее, во внешней оболочке аморфных проводов с не слишком малым по

абсолютной величины значением константы магнитострикции наблюдается в некоторых экспериментах так называемая бамбуковая доменная структура (БДС), которая состоит из чередующихся кольцевых доменов с противоположным направлением намагниченности. Условия наблюдения БДС и ее природа до сих пор неясны.

В данном разделе мы изучаем возможные причины образования БДС в проводе с отрицательным значением константы магнитострикции. Рассматриваем влияние малых нарушений аксиальной симметрии провода на распределение намагниченности в его внешней оболочке. Оказывается, что за счет достаточно большого значения намагниченности насыщения провода даже небольшие возмущения аксиальной симметрии провода приводят к появлению объемных или поверхностных магнитных зарядов заметной величины. Если указанные возмущения меняются медленно вдоль длины провода, на расстояниях, значительно больших радиуса провода, то появившиеся за счет возмущения магнитные заряды вносят существенный вклад в магнитостатическую энергию провода. Вследствие этого возникновение БДС в таком проводе энергетически выгодно, так как приводит к уменьшению магнитостатической энергии провода.

Рассмотрим две простейшие возможные причины нарушения симметрии провода. В случае, показанном на рис. 3,а, предполагается, что по-

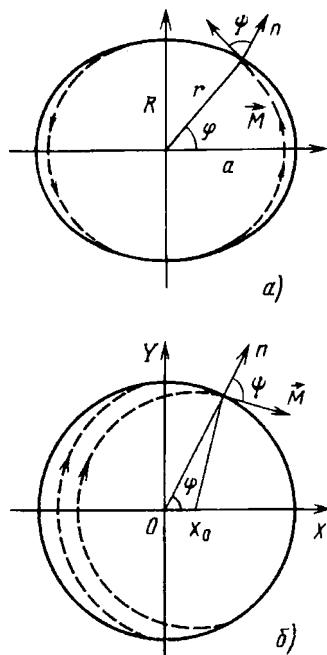


Рис. 3. К расчету плотности поверхностных магнитных зарядов, возникающих за счет: а — эллиптической деформации поперечного сечения провода с малым эксцентриситетом $\varepsilon = \sqrt{1 - (R/a)^2}$; б — за счет небольшого сдвига ($x_0/R \ll 1$) центра распределения легких осей анизотропии по отношению к центру провода

перечное сечение провода испытывает эллиптическую деформацию с малым эксцентриситетом:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{a}\right)^2} \ll 1, \quad (11)$$

где $a > R$ — полуоси эллипса.

При этом распределение остаточных закалочных напряжений предполагается, тем не менее, аксиально симметричным. Следовательно, во внешней оболочке провода легкая ось анизотропии направлена азимутально. Предположим далее, что константа анизотропии K_e имеет вблизи поверхности провода достаточно большое значение. Тогда распределение намагниченности в проводе в первом приближении описывается тем же самым уравнением (3). В результате объемные магнитные заряды отсутствуют, однако на поверхности провода появляются поверхностные магнитные заряды с поверхностной плотностью $\sigma_1 = \pm M_s \cos \psi$, где ψ — угол между направлением единичного вектора намагниченности и нормалью к поверхности эллипса (см. рис. 3,а). Знак в этом уравнении определяется направлением вращения намагниченности во внешней оболочке. В полярных координатах (r, φ) эллипс описывается уравнением

$$r = \frac{R}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 \cos^2 \varphi}} \approx R \left(1 + \frac{\varepsilon^2}{2} \cos^2 \varphi \right). \quad (12)$$

С учетом (12) можно показать, что в низшем приближении по ε плотность поверхностного заряда

$$\begin{aligned} \sigma_1(\varphi) &= \pm M_s \frac{\varepsilon^2 \sin \varphi \cos \varphi}{[\sin^2 \varphi + (1 - \varepsilon^2)^2 \cos^2 \varphi]^{1/2}} \approx \\ &\approx \pm M_s \varepsilon^2 \sin \varphi \cos \varphi. \end{aligned} \quad (13)$$

Рассмотрим теперь случай, показанный на рис. 3,б, где провод предполагается аксиально симметричным, однако допускается, что центр распределения легких осей анизотропии сдвинут по отношению к центру провода на некоторое малое расстояние x_0 . Допустим далее, что центр вихревого распределения намагниченности типа (13) также сдвинут и совпадает с точкой $(x_0, 0)$. Очевидно, при этом энергия анизотропии провода имеет минимум. По аналогии с предыдущими вычислениями можно показать, что за счет сдвига распределения намагниченности на поверхности провода возникает магнитный заряд с поверхностной плотностью

$$\sigma_2(\varphi) = \pm M_s \frac{x_0}{R} \sin \varphi. \quad (14)$$

Чтобы найти равновесный период доменной структуры, необходимо минимизировать сумму

магнитостатической энергии провода, связанной с наличием магнитных зарядов (13) или (14), и энергию 180°-х доменных границ, разделяющих противоположно намагниченные домены. Предположим, что внешняя оболочка аморфного провода с отрицательным значением константы магнитострикции разделена на N кольцевых доменов с чередующейся намагниченностью $\alpha_\varphi = \pm 1$ одинаковой длины L_0 , так что $N = L_z/L_0$, где L_z — длина провода.

Мы рассмотрим далее только случай эллиптически деформированного провода (см. рис. 3,а), так как вычисления в обоих случаях аналогичны.

Полную магнитостатическую энергию провода можно записать как сумму вкладов:

$$W_m = \sum_{i=1}^N W_m^{(i,i)} + \sum_{i < j} W_m^{(i,j)} = M W_m^{(1,1)} + (N-1) W_m^{(1,2)} + (N-2) W_m^{(1,3)} + \dots, \quad (15)$$

где $W_m^{(i,j)}$ — энергия магнитостатического взаимодействия i -го и j -го доменов. Для собственной магнитостатической энергии домена в низшем приближении по ε получаем

$$W_m^{(1,1)} = \frac{1}{2} \int_0^{L_0} \int_0^{2\pi} dz_1 dz_2 \int_0^{2\pi} d\varphi_1 d\varphi_2 \times \\ \times \frac{M_s^2 \varepsilon^4 \frac{1}{4} \sin 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2}{[(z_1 - z_2)^2 + 2R^2 (1 - \cos(\varphi_1 - \varphi_2))]^{1/2}}.$$

Интегрируя по z_1, z_2 и $\varphi_1 - \varphi_2$, можно привести этот интеграл к виду

$$W_m^{(1,1)} = \frac{\pi}{8} M_s^2 \varepsilon^4 L_0 R^2 g_1 \left(\frac{R}{L_0} \right), \quad (16)$$

где

$$g_1 \left(\frac{R}{L_0} \right) = \int_0^{2\pi} d\varphi \cos 2\varphi \Phi_0(\xi); \quad \xi^2 = \left(\frac{2R}{L_0} \right)^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}; \\ \Phi_0(\xi) = \ln \frac{\sqrt{1+\xi^2} + 1}{\sqrt{1+\xi^2} - 1} + 2(|\xi| - \sqrt{1+\xi^2}). \quad (16a)$$

Аналогичные преобразования приводят к следующему выражению для энергии магнитостатического взаимодействия различных доменов:

$$m^{(1,j)} = (-1)^{j-1} \frac{\pi}{4} M_s^2 \varepsilon^4 L_0 R^2 g_j \left(\frac{R}{L_0} \right), \quad j > 1. \quad (17)$$

Здесь функция g_j определяются как и в (16а) с той разницей, что Φ_0 заменяется на Φ_{j-1} , где

$$\Phi_j(\xi) = 2j \ln [\sqrt{j^2 + \xi^2} - j] - 2(j+1) \times \\ \times \ln [\sqrt{(j+1)^2 + \xi^2} - (j+1)] - 2(j-1) \times$$

$$\times \ln [\sqrt{(j-1)^2 + \xi^2} - (j-1)] + 2\sqrt{j^2 + \xi^2} - \\ - \sqrt{(j+1)^2 + \xi^2} - \sqrt{(j-1)^2 + \xi^2}. \quad (17a)$$

Нормируя сумму энергий (16), (17) на $M_s^2 V = M_s^2 \pi R^2 L_z$, получаем для полной приведенной магнитостатической энергии БДС выражение

$$w_m \approx \frac{N \left(W_m^{(1,1)} + \sum_{j=2} W_m^{(1,j)} \right)}{M_s^2 V} = \frac{\varepsilon^4}{8} \times \\ \times \left[g_1 \left(\frac{R}{L_0} \right) + 2 \sum_{j=2} (-1)^{j-1} g_j \left(\frac{R}{L_0} \right) \right]. \quad (18)$$

В случае $L_0 \sim R$ достаточно учесть несколько первых членов ряда (18), так как в этом случае энергия магнитостатического взаимодействия различных доменов (17) достаточно быстро убывает с увеличением разности $|j-1|$.

Определим полную энергию доменных границ, разделяющих противоположно намагниченные домены. Пусть γ будет удельной энергией доменной границы на единицу площади, а R_1 — внутренним радиусом оболочки провода, где реализуется БДС. Тогда выражение для нормированной полной энергии доменных границ можно записать в виде

$$w_s = \frac{(n-1) \pi (R^2 - R_1^2) \gamma}{M_s^2 V} \approx \left[1 - \left(\frac{R_1}{R} \right)^2 \right] \frac{\lambda}{L_0}, \quad (19)$$

где $\lambda = \gamma/M_s^2$ — характеристическая длина в теории доменной структуры.

Принимая во внимание, что толщина внешней оболочки аморфного провода достаточно велика, порядка 10–20 мкм [1, 8] можно предположить [16], что кольцевые домены разделены доменными границами блоховского типа несмотря на возможную достаточно малую величину эффективной константы анизотропии во внешней оболочке. Следовательно, удельную энергию доменной границы можно оценить как $\gamma \approx (CK_e)^{1/2}$.

Заметим, что приведенные рассуждения основаны на предположении, что вблизи поверхности аморфного провода константа магнитной анизотропии не является слишком малой, так что по крайней мере вблизи поверхности провода поле анизотропии сравнимо по величине с характерным полем поверхностных зарядов. До сих пор, однако, неясно для каких типов аморфных проводов это предположение оказывается справедливым. Указанное предположение представляется сомнительным, в частности для аморфных проводов с исчезающе малым значением константы магнитострикции, в которых наблюдается ГМКС [4–6]. Следовательно, важно учесть воз-

можное влияние размагничивающих полей на распределение намагниченности вблизи поверхности аморфного провода. Качественно можно учесть этот эффект следующим образом. Пусть ψ_0 — угол между направлением легкой оси и направлением нормали к поверхности провода. Так как легкая ось направлена почти параллельно поверхности провода, то $\pi/2 - \psi_0 \ll 1$. За счет влияния размагничивающего поля единичный вектор намагниченности отклоняется от легкой оси и располагается под углом ψ к нормали, так что вблизи поверхности провода $\psi_0 < \psi < \pi/2$. Плотность поверхностного магнитного заряда будет при этом равна $\sigma = M_s \cos \psi$, а нормальная компонента размагничивающего поля на расстоянии от поверхности, гораздо меньшем радиуса провода, будет $H_{\perp} = -2\pi\sigma(\psi)$. Следовательно, плотность энергии вблизи поверхности провода равна

$$w_s = K_e \sin^2(\psi - \psi_0) + 2\pi M_s^2 \cos^2 \psi. \quad (20)$$

Минимизируя (20) по отношению к углу ψ , находим для равновесного значения этого угла

$$\psi \approx \frac{\pi}{2} - \left(\frac{\pi}{2} - \psi_0 \right) \frac{\xi}{1 + \xi}; \quad \xi = \frac{K_e}{2\pi M_s^2}. \quad (21)$$

Следовательно в случае, когда значение параметра ξ мало, единичный вектор намагниченности оказывается почти параллельным поверхности провода. В результате плотность поверхностного заряда становится равной

$$\sigma = M_s \cos \psi \approx M_s \frac{\xi}{1 + \xi} \cos \psi_0. \quad (22)$$

Чтобы принять этот эффект во внимание, достаточно умножить уравнение (18) на множитель $[\xi/(1+\xi)]^2$.

Равновесный период БДС, возникающей во внешней оболочке провода с отрицательным значением константы магнитострикции, показан на рис. 4 как функция эффективной константы анизотропии. Вычисления выполнены в соответствии с уравнениями (18), (19), (22) для различного, но близкого к единице отношения полуосей провода. При этом использовались значения $M_s = 500$ Гс, $C = 10^{-6}$ эрг/см и $R = 6 \cdot 10^{-3}$ см [8]. Как видно из рис. 4, период БДС может быть сравним с радиусом провода в случае, когда эффективная константа анизотропии вблизи поверхности провода больше или около $K_e = 20$ эрг/см³. Для меньших значений этой константы плотность поверхностного магнитного заряда уменьшается за счет действия размагничивающего поля и период БДС становится очень большим.

В предыдущем разделе мы показали, что магнитная анизотропия провода связана с распределением остаточных закалочных напряжений по

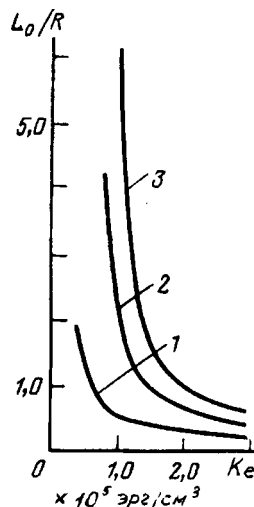


Рис. 4. Равновесный период БДС как функция величины константы анизотропии вблизи поверхности аморфного провода при различных значениях отношения полуосей R/a и эффективной толщины $R-R_1$ внешней оболочки: 1 — $R/a=0,8$; $(R-R_1)/R=0,05$; 2 — $R/a=0,9$; $(R-R_1)/R=0,05$; 3 — $R/a=0,8$; $(R-R_1)/R=0$

его сечению. В результате эффективная константа анизотропии может увеличиваться с увеличением координаты вдоль радиуса провода и принимать максимальное значение на поверхности провода. Качественно этот эффект можно учесть, принимая толщину внешней оболочки провода несколько меньшей, чем она есть в действительности. Чтобы учесть этот фактор, на рис. 4 мы показываем период БДС для различных значений R_1/R . Если отношение R_1/R увеличивается, то относительный вклад энергии доменных границ в полную энергию провода уменьшается, однако это не приводит к существенному изменению периода БДС. Аналогичные результаты для равновесного периода БДС получаются также для второго из рассмотренных выше случаев нарушения аксиальной симметрии провода, показанного на рис. 3,б.

Из приведенных выше аргументов следует, что для достаточно магнитомягких аморфных проводов магнитостатическая энергия провода, возникающая за счет различных типов нарушения его симметрии, может быть значительно уменьшена без образования доменной структуры типа БДС. Это представляется справедливым, в частности, для аморфных проводов с исчезающе малым значением константы магнитострикции, в которых наблюдается ГМКС [4–6]. Конечно, в отсутствие экспериментальных данных нельзя исключить возможность существования на поверхности провода слоя с достаточно большим значением константы анизотропии. Кроме того, БДС в проводе может существовать как метастабильное образование. Известно, например, что в магнитомягких ферромагнетиках энергия не-

которых метастабильных состояний может быть близкой к энергии основного состояния. Например, в прямоугольных пермалловых пластинках простая структура типа Ландау—Лифшица часто имеет наименьшую удельную энергию; при этом экспериментально наблюдается [17] также более сложная концертинная доменная структура, имеющая заведомо большую удельную энергию.

4. Размеренный эффект в аморфном проводе.

В предыдущих разделах работы мы показали, что распределение намагниченности вдали от торцов достаточно длинного аморфного провода определяется закалочными напряжениями и связанными с ними магнитоупругими взаимодействиями. Этот подход естественно объясняет существование кора и внешней оболочки в аморфных проводах различных типов. Оценки, основанные на величине остаточной намагниченности провода, показывают, что в типичном аморфном проводе на основе кобальта диаметром 125 мкм радиус R_1 внутреннего кора, однородно намагниченного вдоль оси провода, составляет приблизительно $(2 \div 4) \cdot 10^{-3}$ см. Если допустить, что распределение намагниченности типа (3), не зависящее от координаты z вдоль оси провода, остается неизменным вплоть до его торцов, то на торцах провода, в области $\rho < R_1$, возникают поверхностные магнитные заряды с достаточно большой поверхностной плотностью $\sigma = M_z$. Очевидно, что размагничивающее поле этих зарядов должно сильно перестраивать распределение намагниченности вблизи торцов провода. В данном разделе рассмотрим интересный размерный эффект, возникающий в аморфном проводе конечной длины за счет влияния размагничивающих полей.

Для аморфных проводов на основе железа было выдвинуто предположение [18], что вблизи торцов провода под влиянием размагничивающего поля возникают домены с обратным направлением намагниченности. Эта точка зрения была недавно [19] подтверждена наблюдением весьма длинных конусообразных замыкающих доменов на полированных торцах аморфного провода на основе железа. Следует заметить, однако, что для аморфного провода на основе железа константа магнитострикции на несколько порядков больше соответствующей величины для аморфного провода на основе железа [8]. Фактически аморфный провод на основе кобальта является магнитомягким ферромагнетиком с рекордно низким значением эффективной константы магнитной анизотропии. Для таких ферромагнетиков, как известно [20—21], уменьшение плотности поверхностных магнитных зарядов, происходит, как правило, за счет разворота намагниченности

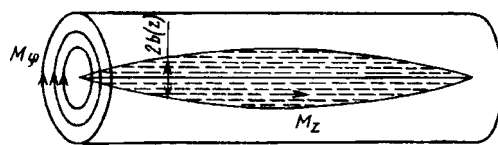


Рис. 5. Распределение намагниченности в коротком куске аморфного провода на основе кобальта. Средняя намагниченность кора направлена параллельно оси провода. Эффективный радиус кора $b(z)$ уменьшается по направлению к торцам провода за счет разворота намагниченности вблизи торцов провода

вблизи поверхности образца. Разумно предположить, что магнитостатическая энергия провода может быть значительно уменьшена за счет аналогичного разворота намагниченности вблизи торцов провода, как это показано схематически на рис. 5. Конечно, разворот намагниченности приводит к увеличению энергии магнитной анизотропии и преобразованию поверхностных магнитных зарядов в объемные. В результате вблизи торцов провода образуется некоторое весьма плавное распределение намагниченности, для которого продольная компонента намагниченности, усредненная по сечению провода, постепенно уменьшается до нуля по направлению к торцам провода. Заметим, что этот факт находится в согласии с экспериментальными данными [22], где было показано, что продольная компонента намагниченности аморфного провода на основе кобальта плавно уменьшается вблизи его торцов в интервале нескольких сантиметров.

Кроме того, нами выявлено, что остаточная намагниченность короткого провода должна зависеть от его длины L_z . Более точно, существует критическая длина провода L_z^* , такая, что при $L_z < L_z^*$ влияние размагничивающего поля на остаточную намагниченность провода существенно. Понятие критической длины кратко обсуждалась ранее в работах [2, 3].

Рассмотрим распределение намагниченности в коротком отрезке аморфного провода на основе кобальта с исчезающе малым значением константы магнитострикции. В модели, рассмотренной во втором разделе, в области $\rho < R_1$ легкая ось анизотропии параллельна оси провода, так что в средней части длинного образца, в области $\rho < R_1$, возникает кор, однородно намагниченный вдоль оси провода. Однако в коротком образце предполагаем, что в области кора намагниченность провода будет также разворачиваться, с тем чтобы уменьшить магнитостатическую энергию поверхностных и объемных магнитных зарядов. Для простоты предполагаем, что внешняя оболочка провода, в которой намагниченность направлена азимутально, не оказывает существенного влияния на распределение намагниченности в области кора, и фактически пренебрегаем

наличием внешней оболочки провода в рассматриваемой ниже вариационной модели.

Эффект разворота намагниченности в области кора может быть качественно описан с помощью пробной вариационной функции того же вида, который использовался ранее [21] для описания вихревых распределений намагниченности в магнитомягких ферромагнитных частицах:

$$\alpha_\rho = 0; \quad \alpha_\varphi = \begin{cases} \frac{2\rho b(z)}{\rho^2 + b^2(z)}, & \rho < b \\ 1, & \rho > b \end{cases}; \quad \alpha_z = \sqrt{1 - \alpha_\varphi^2}. \quad (23)$$

Здесь $b(z)$ — эффективный радиус кора, так как при $\rho < b$ α_z — компонента единичного вектора намагниченности, отлична от нуля, в то время как при $\rho > b$ эта компонента исчезает. Для короткого провода используем следующее модельное выражение для зависимости радиуса кора от координаты вдоль оси провода:

$$b(z) = b_0 [1 - (2z/L_z)^2]; \quad |z| \leq L_z/2, \quad (24)$$

где b_0 — максимальное значение радиуса кора в середине провода; эта величина рассматривается как вариационный параметр. Следует ожидать, что b_0 увеличивается с увеличением длины провода.

Легко видеть, что для модели (24) эффективный радиус b обращается в нуль на торцах провода при $z = \pm L_z/2$, так что поверхностные магнитные заряды вообще отсутствуют. Тем не менее, имеется объемный магнитный заряд, распределенный в области кора с плотностью

$$M_s q(\rho, z) = -M_s \frac{\partial \alpha_z}{\partial z} = \begin{cases} -M_s \frac{4b\rho^2}{(b^2 + \rho^2)^2} \frac{db}{dz}; & \rho \leq b \\ 0, & \rho > b \end{cases}. \quad (25)$$

Таким образом, в модели (24) поверхностные магнитные заряды рассеиваются в объем провода. Далее покажем, что это приводит к существенному уменьшению магнитостатической энергии провода. Конечно, можно было бы рассмотреть и более сложную модель с двумя вариационными параметрами, в которой радиус b имел бы ненулевое значение на торцах провода. Тогда на торцах провода, в области $\rho < b$, существовал бы некоторый остаточный поверхностный заряд.

Поскольку для обеих моделей результаты качественно схожи, далее ограничимся простой моделью (24), которая допускает аналитическое рассмотрение. При этом магнитостатическая энергия провода может быть записана в виде

$$W_m = \frac{M_s^2}{2} \int dv_1 \int dv_2 \frac{q(\vec{r}_1) q(\vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}, \quad (26)$$

где интегрирование производится по объему кора.

В отличие от магнитостатической энергии, энергия магнитной анизотропии за счет раз-

ворота намагниченности в области кора увеличивается. Для простоты будем считать, что в области кора энергия магнитной анизотропии может быть записана в виде

$$W_a = 2\pi K_e \int_{|z| \leq L_z/2} dz \int_0^{R_1} \rho d\rho \alpha_\varphi^2(\rho), \quad (27)$$

где K_e — среднее значение константы анизотропии по сечению кора.

Учтем также влияние слабого внешнего магнитного поля, приложенного вдоль оси провода. Тогда увеличение энергии Зеемана за счет разворота намагниченности равно

$$\Delta W_z = 2\pi M_s H_0 \int_{|z| \leq L_z/2} dz \int_0^{R_1} \rho d\rho (1 - \alpha_z), \quad (28)$$

причем H_0 — амплитуда внешнего магнитного поля.

Так как радиус кора в типичном аморфном проводе, $R_1(2 \div 4) \cdot 10^{-3}$ см [8], велик по сравнению с обменной длиной, то вклад обменной энергии в полную энергию провода пренебрежимо мал. Следовательно, равновесное значение параметра b_0 может быть определено путем минимизации суммы энергий (26)–(28).

1. *Случай короткого провода, $b_0 \leq R_1$.* Рассмотрим сначала случай короткого провода, для которого значение вариационного параметра $b_0 \leq R_1$. В этом случае выкладки можно провести аналитически. Используя соотношения (23), (24) в (27), получаем для энергии анизотропии кора следующее выражение:

$$W_a = K_e V_1 [1 - \xi_a (b_0/R_1)^2]; \quad \xi_a = \frac{8}{15} (3 - 4 \ln 2), \quad (29)$$

где $V_1 = \pi R_1^2 L_z$ — объем кора.

Для вычисления магнитостатической энергии провода примем во внимание, что радиус кора, даже будучи порядка радиуса провода, много меньше длины провода, поэтому функция $b(z)$ является чрезвычайно медленной. Используя известный метод [23], введем некоторую вспомогательную длину l , такую, что $R_1 \ll l \ll L_z$, и запишем магнитостатическую энергию (26) как сумму вкладов:

$$W_m = W_m^{(1)} + W_m^{(2)}. \quad (30)$$

Здесь предполагается, что в первом члене в правой части (30) интегрирование производится по области $|z_1 - z_2| \geq 2l$, а во втором — по области $|z_1 - z_2| \leq 2l$. Так как провод тонкий, в первом интеграле можно приближенно положить $|\vec{r}_1 - \vec{r}_2| \approx |z_1 - z_2|$. Тогда, используя выражение для приведенной плотности магнитного заряда на единицу длины провода

$$\bar{q}(z) = 2\pi \int_0^{R_1} \rho d\rho q(\rho, z) = -4\pi [\ln 2 - 1/2] b \frac{db}{dz};$$

$$b_0 \leq R_1, \quad (31)$$

можно записать первый член в (30) в виде

$$W_m^{(1)} = \frac{M_s^2}{2} \iint_{|z_1 - z_2| \geq 2l} dz_1 dz_2 \frac{\bar{q}(z_1) \bar{q}(z_2)}{|z_1 - z_2|}.$$

С логарифмической точностью этот интеграл можно оценить как [3]

$$W_m^{(1)} \approx M_s^2 \int_{|z| \leq L_z/2} dz \bar{q}^2(z) \ln \frac{L_z}{2l}. \quad (32)$$

Далее, в силу условия $|z_1 - z_2| \leq 2l$, во втором интеграле (30) можно положить

$$b(z_1) \approx b(z_2); \quad q(\rho_2, z_2) \approx q(\rho_2, z_1).$$

Кроме того, усредняя плотность заряда (25) по сечению провода, положим приближенно

$$q(\rho, z) \approx \frac{1}{\pi b^2(z)} qbqr(z).$$

С учетом этих аппроксимаций, можно оценить второй член в (30) следующим образом:

$$W_m^{(2)} \approx M_s^2 \int_{|z| \leq L_z/2} dz \bar{q}^2(z) \ln \frac{2l}{b(z)}. \quad (32a)$$

Следовательно, сумма выражений (32) и (32a) не содержит произвольной длины совсем:

$$W_m \approx M_s^2 \int_{|z| \leq L_z/2} dz \bar{q}^2(z) \ln \frac{L_z}{b(z)}. \quad (33)$$

Наконец, принимая во внимание уравнения (24) и (31), получаем для вклада магнитостатической энергии в полную энергию кора выражение

$$W_m = \xi_m M_s^2 b_0^3 \frac{L_z}{L_z} \ln \frac{L_z}{b_0}, \quad \xi_m = \frac{128}{105} \left[4\pi \left(\ln 2 - \frac{1}{2} \right) \right]^2. \quad (34)$$

Заметим, что магнитостатическая энергия круга радиусом b_0 , однородно заряженного с поверхностной плотностью $\sigma = M_s$, пропорциональна величине $M_s^2 b_0^3$. Следовательно, рассеяние поверхностного заряда в объем приводит к существенному уменьшению магнитостатической энергии кора за счет наличия фактора $b_0/L_z \ll 1$. Очевидно, это обстоятельство и является причиной для разворота намагниченности в области кора.

Увеличение энергии Зеемана за счет разворота намагниченности кора может быть вычислено с помощью соотношений (23), (24) и (28) как

$$\Delta W_z = M_s H_0 V_1 [1 - \xi_H (b_0/R_1)^2],$$

$$\xi_H = 8(\ln 2 - 0,5)/15. \quad (35)$$

Далее будем считать амплитуду внешнего поля H_0 положительной, если направление поля и направление намагниченности кора совпадают. В таком случае увеличение поля приводит к соответствующему увеличению величины b_0 .

Минимизируя сумму энергий (29), (34) и (35) по отношению к b_0 , получаем для равновесной величины этого параметра выражение

$$b_0 = L_z \left[\left(\eta_1 \frac{K_e}{M_s^2} + \eta_2 \frac{H_0}{M_s} \right) / \left| \ln \left(\eta_1 \frac{K_e}{M_s^2} + \eta_2 \frac{H_0}{M_s} \right) \right| \right]^{1/2}, \quad (36)$$

где численные коэффициенты равны $\eta_1 = \pi \xi_a / 2 \xi_m \approx 0,027$ и $\eta_2 = \pi \xi_H / 2 \xi_m \approx 0,023$.

Как видно из уравнения (36) в модели (24) эффективный радиус кора в середине провода пропорционален его длине, однако, с очень малым коэффициентом пропорциональности.

Определим критическую длину провода при $H_0 = 0$ с помощью соотношения $b_0(L_z^*) = R_1$. Тогда из (36) находим:

$$L_z^* = R_1 \left[\frac{M_s^2}{\eta_1 K_e} \ln \frac{M_s^2}{\eta_1 K_e} \right]^{1/2}. \quad (37)$$

Полагая $M_s = 500$ Гс, $K_e = 250$ эрг/см³ [8], видим, что отношение $M_s^2 / \eta_1 K_e \approx 4 \cdot 10^4$ для аморфного провода на основе кобальта чрезвычайно велико, так что в рассматриваемом случае $L_z^* \approx 600 R_1$. Это означает, что для провода, в котором исходный радиус кора составлял $R_1 = (2 \div 4) \cdot 10^{-3}$ см, критическая длина составляет порядка нескольких сантиметров, что качественно соответствует экспериментальным данным [22].

В случае $b_0 \leq R_1$ среднее значение продольной компоненты намагниченности в области кора равно

$$\langle M_z \rangle = \frac{2}{R_1^2} \int_0^{b(z)} \rho d\rho \alpha_z = (2 \ln 2 - 1) \left(\frac{b(z)}{R_1} \right)^2, \quad (38)$$

где $b(z)$ определено уравнениями (24) и (36). В отсутствие поля, а также для слабых значений поля это уравнение описывает также продольную компоненту намагниченности всего провода, так как в этом случае вклад внешней оболочки провода с преимущественно азимутальным направлением намагниченности в эту величину мал. На рис. 6 показана приведенная z -компонента намагниченности короткого провода как функция координаты z , построенная в соответствии с уравнением (38). Как видно из этого рисунка, даже слабое внешнее магнитное поле заметно изменяет распределение намагниченности в проводе. Этот

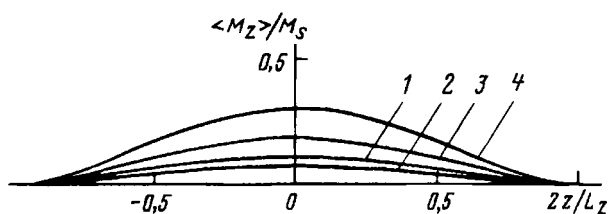


Рис. 6. Продольная компонента намагниченности провода как функция координаты z в аморфном проводе длиной $L_z = 1$ см ($L_z < L_z^*$) и начальным радиусом кора, равным $R_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ см при различных значениях внешнего магнитного поля: 1 — $H_0 = 0$; 2 — $H_0 = -0,1$ Э; 3 — $H_0 = 0,2$ Э; 4 — $H_0 = 0,5$ Э. Константа магнитной анизотропии кора и намагниченность насыщения провода равны $K_e = 250$ эрг/см³ и $M_s = 500$ Гс

факт имеет важное значение для теории ГМКС в коротких аморфных проводах.

2. Случай длинного провода. Рассмотрим теперь провод с длиной, превышающей критическую, когда равновесное значение вариационного параметра $b_0 > R_1$. Тогда в средней части провода, при $|z| \leq z_0$ выполняется неравенство $b(z) > R_1$, тогда как противоположное неравенство справедливо вблизи концов провода, в интервалах $z_0 \leq |z| \leq L_z/2$. Здесь z_0 соответствует точке, в которой $b(z_0) = R_1$, так что $z_0 = L_z \sqrt{1 - R_1/b_0}/2$. Заметим, что в случае $b_0 > R_1$ уравнение (31) описывает приведенную плотность заряда на единицу длины только вблизи торцов провода, тогда как в интервале $|z| \leq z_0$ эта величина дается соотношением

$$\bar{q}(z) = -4\pi b \frac{db}{dz} \left\{ \ln \left[1 + \left(\frac{R_1}{b} \right)^2 \right] - \frac{1}{1 + (b/R_1)^2} \right\}. \quad (39)$$

Этот факт следует учитывать при вычислении магнитостатической энергии провода по уравнению (33). Интегрирование по координате z в уравнениях (27)–(28) также должно быть проведено в указанных интервалах по отдельности. Так как в данном случае вычисления довольно громоздки, равновесное значение вариационного параметра определяется численно путем минимизации суммы выражений (26)–(28)

Далее в случае $b_0 > R_1$ соотношение (38) дает среднюю продольную компоненту намагниченности провода только в интервалах $z_0 \leq |z| \leq L_z/2$. В средней же части провода эта величина дается уравнением

$$\frac{\langle M_z \rangle}{M_s} = \left(\frac{b}{R_1} \right)^2 \left\{ 2 \ln \left[1 + \left(\frac{R_1}{b} \right)^2 \right] - \left(\frac{R_1}{b} \right)^2 \right\}. \quad (40)$$

На рис. 7 показана продольная компонента намагниченности в проводе с длиной, больше критической, для различных, но достаточно малых значений внешнего магнитного поля. Видно, что эта компонента в средней части провода

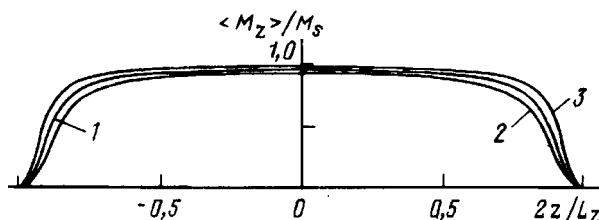


Рис. 7. Продольная компонента намагниченности провода как функция координаты z в аморфном проводе длиной $L_z = 5$ см ($L_z > L_z^*$) для различных значений внешнего магнитного поля: 1 — $H_0 = 0$; 2 — $H_0 = -0,2$ Э; 3 — $H_0 = 0,5$ Э. Остальные параметры те же, что и на рис. 6

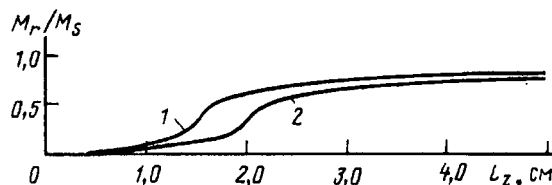


Рис. 8. Остаточная намагниченность аморфного провода как функция его длины при различных исходных значениях радиуса кора: 1 — $R_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ см; 2 — $R_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ см. Константа магнитной анизотропии кора и намагниченность насыщения те же, что и на рис. 6

насыщается в соответствии с наблюдаемым экспериментальным поведением этой компоненты в достаточно длинном куске аморфного провода на основе кобальта [22].

Используя соотношения (38), (40), можно вычислить остаточную намагниченность провода как функцию его длины. Результат этих вычислений показан на рис. 8 для проводов с различными исходными значениями радиуса кора. Критические длины составляют $L_z^* = 1,4$ см и $L_z^* = 1,85$ см для кривых 1 и 2 соответственно. Следовательно, для модели (24) критическая длина, определенная соотношением (37), приблизительно соответствует точкам на рис. 8, где остаточная намагниченность провода как функция его длины сравнительно резко меняется.

В заключение заметим, что проведенное рассмотрение не ограничено простым модельным выражением (24), принятым для эффективного радиуса кора $b(z)$, а может быть обобщено на достаточно широкий класс таких зависимостей. Действительно, оценка (33) для магнитостатической энергии тонкого провода остается справедливой для любой гладкой функции $b(z)$, исчезающей на торцах провода. Соответствующее обобщение вариационной процедуры качественно приводит к схожим результатам: 1) продольная компонента намагниченности провода является колоколообразной функцией координаты z с широким плато для провода, длина которого больше критической; 2) остаточная намагниченность короткого провода есть монотонно возрастающая функция его длины.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Amorphous** wires and their applications / P.T. Square, D. Atkinson, M.R.J. Gibbs and S. Atalay / — J. Magn. Magn. Mater. 1994, vol. 132, № 1.
2. **Vazquez M. and Chen D.X.** The magnetization reversal processes in amorphous wires. — IEEE Trans. Magn. 1995, vol. 31, № 2.
3. **Vazquez M. and Hemando A.** A soft magnetic wire for sensor applications. — J. Phys. D: Appl. Phys. 1996, vol. 29, № 2.
4. **Magneto-inductive** effect in amorphous wires / K. Mohn, T. Kohzawa, K. Kawashima, H. Yoshida and L.V. Panina. IEEE Trans. Magn. 1992, vol. 28, № 4.
5. **Beach R.S. and Berkowitz A.E.** Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire. Appl. Phys. Lett. 1994, vol. 64, № 26.
6. **Panina L.V., Mohri K., Bushida K. and Noda M.** Giant magneto-impedance and magnetoinductive effects in amorphous wires. J. Appl. Phys. 1994, vol. 76, № 10.
7. **Reintraant** magnetic flux reversal in amorphous wires. — In: Magnetic Properties of Amorphous Metals / F.B. Humphrey, K. Mohri, J. Yamasaki, et al. ed. A. Hernando, V. Madurga, M.S. Sanches, M. Vazquez. — Amsterdam, Elsevier Scientific Publisher, 1987.
8. **Large** Barkhausen and Matteucci effects in FeCoSiB, FeGrSiB and FeNiSiB amorphous wires / K. Mohri, F.B. Humphrey, K. Kawashima et al. — IEEE Trans. Magn. 1990, vol. 26, № 5.
9. **Вонсовский С.В.** Магнетизм. — М.: Наука, 1971.
10. **Theoretical** analysis of residual stress effects on the magnetostrictive properties of amorphous wires / J. Lui, R. Malmhall, L. Amberg and S.J. Savage. Appl. Phys. 1990, vol. 67, № 10.
11. **Magnetoelastic** anisotropy in amorphous wires due to quenching / J. Velazquez, M. Vazquez, Hernando et al. — J. Appl. Phys. 1991, vol. 70, № 10.
12. **Takajo M., Yamasaki J. and Humphrey F.E.** Domain observations of Fe and Co based amorphous wires. IEEE Trans. Magn. 1993, vol. 29, № 6.
13. **Brown W.F.Jr.** Micromagnetics. New York: Interscience, 1963.
14. **Usov N.A. and Peschany S.E.** Flower state micromagnetic structures in a fine perel-lepiped and a flat cylinder. — J. Magn. Magn. Mater. 1994, vol. 135, № 1.
15. **A. Aharoni and S. Shtrikman.** Magnetization curve of the infinite cylinder. — Phys. Rev. vol. 109, № 5, 1958.
16. **A. Hubert.** Domain wall structures in thin magnetic films. — IEEE Trans. Magn. vol. 11, № 5, 1975.
17. **Voort F.A.N. van der and H.A.M. Berg van der.** Irreversible processes in soft-ferromagnetic thin films. — IEEE Trans. Magn. 1987, vol. 23, № 1.
18. **Influence** of the sample length on the switching process of magnetostrictive amorphous wires / A.M. Severino, C. Gomez-Polo, P. Marin and M. Vazques. — J. Magn. Magn. Mater. 1992, vol. 103, № 2.
19. **Magnetic** domain observations in amorphous wires / T. Reininger, H. Kronmuller, C. Gomez-Polo and M. Vazquez. — J. Appl. Phys. 1993, vol. 73, № 11.
20. **Yan Y.D. and Della Torre E.** Modelling of elongated fine ferromagnetic particles. — J. Appl. Phys. 66, 1989, № 1.
21. **Usov N.A. and Peschany S.E.** Magnetization curling in fine cylindrical particle. — J. Magn. Magn. Mater. 1993, vol. 118, № 3.
22. **Chen D.X., Gomez-Polo C. and Vazquez M.** Magnetization profile determination in amorphous wires. J. Magn. Magn. Mater. 1993, vol. 124, № 1.
23. **Landau L.D. and Lifshitz E.M.** Electrodynamics of Continuous Media, 2nd ed. 1984 (Pergamon, New York).
24. **Hirono S., Nonaka K. and Hatakeyama L.** Magnetization distribution analysis in the film edge region under a homogeneous field. — J. Appl. Phys. 1986, vol. 60, № 10.

[25.09.97]

Авторы: Усов Николай Александрович окончил физический факультет Московского государственного университета в 1972 г. Защитил кандидатскую диссертацию в 1983 г. в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова по теме «Влияние сильного магнитного поля на свойства квазидвумерного электронного газа». Ведущий научный сотрудник в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ, г. Троицк).

Антонов Анатолий Сергеевич окончил факультет молекулярной и химической физики Московского физико-технического института в 1969 г. Защитил кандидатскую диссертацию в 1993 г. в Институте высоких температур РАН по теме «Исследования электрофизических свойств композитных материалов, содержащих ферромагнитные включения». Ведущий научный сотрудник в Научно-исследовательском центре прикладных проблем электродинамики Объединенного института высоких температур РАН (ОИВТАН).

Дыхне Александр Михайлович, академик, окончил металлургический факультет Киевского политехнического института в 1955 г. Докторскую диссертацию защитил в Институте физических проблем в 1972 г. по теме «Ионизационная неустойчивость плазмы». Директор Центра теоретической физики и прикладной математики (ТРИНИТИ, г. Троицк).

Лагарьков Андрей Николаевич окончил факультет электронной техники Московского энергетического института в 1961 г. Докторскую диссертацию по физике конденсированных сред и неидеальной плазмы защитил в 1977 г. в Институте высоких температур АН СССР. Директор Научно-исследовательского центра прикладных проблем электродинамики ОИВТАН.

Универсальная функция эффективной проводимости двухфазной слабо нелинейной среды вблизи порога протекания

СНАРСКИЙ А.А., БУДА С.И.

Для слабо нелинейной среды общего вида с большим отличием значений локальных проводимостей найдены универсальные выражения для эффективной проводимости. Эффективная проводимость выражена через функции, задающие локальную нелинейность. Получены соотношения взаимности для двумерных нелинейных сред.

Ключевые слова: композит, перколяция, нелинейность, критическое поведение

The universal expressions of the effective conductivity for weakly non-linear medium with a great distinction of the values of local conductivities have been obtained in a general form. The effective conductivity is represented through local non-linear functions. The reciprocity relations two-dimensional non-linear mediums are obtained.

Key words: composite, percolation, non-linearity, critical behaviour

1. Введение. Физика нелинейных композитов вблизи порога протекания привлекает постоянное внимание, см., например, [1, 2] и цитируемую там литературу. В частности это связано с тем, что в сильно неоднородных средах распределение полей и токов так же сильно неоднородно, что вынуждает проводить учет отклонения от закона Ома.

Типичной рассматриваемой системой является материал, представляющий собой смесь двух фаз, каждая из которых имеет нелинейную вольт-амперную характеристику. Свойства материала в целом характеризуются эффективной проводимостью σ^e , связывающей по определению средние по объему электрическое поле и ток. В линейном случае величинами, определяющими распределение полей и токов, являются «обычные» линейные локальные проводимости σ_1 и σ_2 , причем в сильно неоднородной среде $\sigma_2/\sigma_1 = h \ll 1$. Обычно [3] рассматривают два предельных случая, следующие из приближения $h=0$. Первый из них, так называемый N/I случай — смесь «нормального» металла с $\sigma_1 \neq \infty$ и идеального изолятора $\sigma_2=0$. Второй так называемый S/N случай — смесь «сверхпроводящего» металла с $\sigma_1=\infty$ и «нормального» металла с $\sigma_2 \neq 0$. В линейном случае при определении σ^e существуют области концентрации хорошо проводящей фазы порога (вблизи него, но не на самом протекании p_c , в которых такое приближение оправдано. В этих областях учет конечного значения h приводит к малым поправкам к основным слагаемым [4, 5]:

$$\sigma^e = \sigma_1 \tau^t (A_1 + A_2 h \tau^{-\varphi} + \dots), \quad p > p_c, \quad \tau \gg \Delta; \quad (1)$$

$$\sigma^e = \sigma_2 |\tau|^{-q} (B_1 + B_2 h |\tau|^{-\varphi} + \dots), \quad p < p_c, \quad |\tau| \gg \Delta, \quad (2)$$

где $\tau = (p - p_c)/p_c$ — близость к порогу протекания; p_c — концентрация хорошо проводящей фазы; t и q — критические индексы проводимости;

$\varphi = t + q$ — так называемый кроссоверный показатель; $\Delta = h^{1/\varphi}$ — величина области размазки (аналог области размытия фазового перехода второго рода).

Необходимо отметить, что в линейном случае при $h \neq 0$ существует такая область концентраций — $|\tau| \leq \Delta$, в которой обе фазы существенны и дают сравнимый вклад в σ^e :

$$\sigma^e = (\sigma_1^q \sigma_2^{1-q})^{1/\varphi} (D_1 + D_2 h^{-1/\varphi} + \dots), \quad |\tau| \leq \Delta. \quad (3)$$

Особенно значимо равенство этого вклада проявляется в двумерном случае, для которого известно точное решение на пороге протекания [6]: $\sigma^e = \sqrt{\sigma_1 \sigma_2}$.

При рассмотрении критического поведения следующих за σ^e токовых моментов (например, второго токового момента $C_{(2)}^e$ — относительной спектральной плотности $1/f$ шума) ситуация коренным образом меняется [7]. Как выше, так и ниже порога протекания, вне области размазки, возможен кроссовер — смена критического поведения, когда при изменении концентрации критическое поведение, определяемое до этого слагаемыми, связанными с одной из фаз, будет определяться другой фазой. Соответственно изменяется и критический индекс, характеризующий это поведение.

В статье [8] для случая N/I было показано, что существует аналогия между критическим поведением $1/f$ шума и эффективной проводимостью слабо нелинейной (кубической) среды. Так как в [8] был рассмотрен N/I случай ($h=0$), вопрос о кроссовере, который для нелинейной проводимости закономерно возникает из аналогии с $1/f$ шумом, не поднимается. В [9] при определении σ^e кубически нелинейной среды были использованы выражения для $1/f$ шума, учитывающие конечное значение h . В настоящей

статье случай кубической нелинейности обобщен на произвольный случай слабой нелинейности.

2. **Локальные и эффективные свойства слабо нелинейных сред.** Стандартная постановка задачи по определению эффективных свойств случайно неоднородной среды следующая. Зная локальную связь между электрическим током $\mathbf{j}(\mathbf{r})$ и полем

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad (4)$$

требуется найти σ^e , связывающую средние по объему поля и токи $\langle \mathbf{j} \rangle = \sigma^e \langle \mathbf{E} \rangle$. Для двухфазной среды вблизи порога протекания ответ известен (1)–(3). В случае слабой нелинейности закон (4) заменяется на следующий:

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}) = b(\mathbf{E}(\mathbf{r})) \mathbf{E}(\mathbf{r}). \quad (5)$$

Предполагая, что материалы фаз обладают инверсионной симметрией $b(-\mathbf{E}) = b(\mathbf{E})$ и учитывая, что рассматривается случай слабой нелинейности, $b(\mathbf{E})$ можно разложить в формальный ряд по четным степеням поля:

$$b_i(\mathbf{E}) = \sigma_i + \chi_i |\mathbf{E}|^2 + \dots = \sum_{n=1} b_{i(n)} |\mathbf{E}|^{2(n-1)}, \quad (6)$$

где первый коэффициент разложения — «обычная» проводимость $b_{i(1)} \equiv \sigma_i$, $i=1, 2$ номера фаз.

Необходимо отметить, что в (6) $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ — поле, определяемое решением нелинейной задачи ($\text{div } \mathbf{j} = 0$, $\text{rot } \mathbf{E} = 0$). Разложение (6) означает, что

$$b_{i(1)} \gg b_{i(2)} E^2 \gg b_{i(3)} E^4 \gg \dots \quad (7)$$

Можно считать, что малым параметром разложения (6) является отношение $|E|/|E_0|$, где $|E_0|$ определяется из условия

$$b_{i(1)} = b_{i(2)} E_0^2. \quad (8)$$

как и для линейного случая, эффективный коэффициент нелинейной среды в законе (6) связывает средние по объему поля и токи:

$$\langle \mathbf{j} \rangle = b^e(\langle \mathbf{E} \rangle) \langle \mathbf{E} \rangle. \quad (9)$$

Воспользовавшись хорошо известным равенством (см., например, [6, 10])

$$\langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \mathbf{j}(\mathbf{r}) \rangle = \langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle \langle \mathbf{j}(\mathbf{r}) \rangle, \quad (10)$$

для $b^e(\langle \mathbf{E} \rangle)$ можем записать

$$b^e(\langle \mathbf{E} \rangle) \langle \mathbf{E} \rangle^2 = \langle b(\mathbf{E}(\mathbf{r})) \mathbf{E}^2(\mathbf{r}) \rangle. \quad (11)$$

Представим $b^e(\langle \mathbf{E} \rangle)$ в виде ряда:

$$b^e(\langle \mathbf{E} \rangle) = \sum_n b_{(n)}^e |\langle \mathbf{E} \rangle|^{2(n-1)}. \quad (12)$$

Аналогично (7) предполагается $b_{(1)}^e \gg b_{(2)}^e |\langle \mathbf{E} \rangle|^2 \gg \dots$, что означает, что параметром

малости, по которому проведено разложение (12), является величина $|\langle \mathbf{E} \rangle|/|E_0|$, где аналогично (8) $\langle \mathbf{E} \rangle_0$ определяется из условия

$$b_{(1)}^e = b_{(2)}^e |\langle \mathbf{E} \rangle_0|^2. \quad (13)$$

Необходимо отметить, что в общем случае, при определении $b^e(\langle \mathbf{E} \rangle)$ для произвольной неоднородной среды, необходимо использовать теорию возмущений и, вводя какой-либо малый параметр, раскладывать по нему не только коэффициенты нелинейной проводимости, но и электрическое поле, считая за нулевое приближение поле линейной задачи. В этом случае, например, в определение $b_{(3)}^e$ войдут различные комбинации электрических полей, полученных разложением по линейному параметру (см., например, [11]). В нашей статье, однако, мы не используем какой-либо вариант теории возмущений. Как будет показано ниже, в сильно неоднородной среде вблизи порога протекания в ряде случаев можно с достаточной точностью найти выражение для электрического поля в главных, определяющих эффективные свойства, элементах структуры без использования теории возмущений. В этом смысле ряд (12) можно считать формальным.

Подставляя (12) и (6) в (11), получаем

$$\sum_n b_{(n)}^e |\langle \mathbf{E} \rangle|^{2n} = \sum_n \langle b_{(n)} \rangle |\langle \mathbf{E} \rangle|^{2n}. \quad (14)$$

Таким образом, задача о вычислении эффективного коэффициента проводимости в слабо нелинейной среде сведена к вычислению взвешенных моментов электрического поля (14).

Для линейного случая задача о взвешенных моментах поля хорошо известна (см., например, [12]). Определяя n -й момент как

$$C_{(n)}^e = \frac{\langle C_{(n)}(\mathbf{r}) \sigma^n(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^{2n} \rangle}{(\sigma^e)^n |\langle \mathbf{E} \rangle|^{2n}} \quad \text{или}$$

$$\langle C_{(n)} \sigma^n |\mathbf{E}|^{2n} \rangle = (\sigma^e)^n C_{(n)}^e |\langle \mathbf{E} \rangle|^{2n}, \quad (15)$$

после суммирования по n получаем

$$\sum_n C_{(n)}^e (\sigma^e)^n |\langle \mathbf{E} \rangle|^{2n} = \sum_n \langle C_{(n)} \sigma^n |\mathbf{E}|^{2n} \rangle. \quad (16)$$

Сравнивая между собой (14) и (16), видим, что они совпадают с точностью до обозначений [13]:

$$b_{(n)}^e \rightarrow (\sigma^e)^n C_{(n)}^e, \quad C_{(n)} \rightarrow b_{(n)}/\sigma^n. \quad (17)$$

Однако в (16) стоит поле \mathbf{E} линейной задачи, а в (14) — нелинейной. Следовательно, воспользоваться известным выражением для $C_{(n)}^e$ при определении $b^e(\langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle)$ можно тогда, когда поле нелинейной задачи можно заменить полем ли-

нейной.

Несмотря на жесткое требование (локальные поля нелинейной задачи совпадают с полями линейной) существует несколько случаев, когда это требование выполняется точно или с наперед заданной точностью. Один из таких случаев — кубически нелинейная среда, такая среда, в которой в выражении (6) можно пренебречь всеми слагаемыми, кроме первых двух.

Впервые аналогия между задачами об эффективной кубической нелинейной проводимости была продемонстрирована в [8]. При $n=2$ согласно теореме Теледжена [14] $b_{(2)}^e$ определяется полем линейной задачи. Таким образом, согласно (17) $b_{(2)}^e$ определяется через второй момент $C_{(2)}^e$, который, как хорошо известно [3, 12], является относительной спектральной плотностью $1/f$ шума. Критическое поведение $1/f$ шума хорошо изучено (см., например, [3, 7, 12, 15]). Для системы с конечным отношением $h=\sigma_2/\sigma_1$ его можно записать в виде [7]:

$$C_{(2)}^e = C_{1(2)}\tau^{-k_2} + C_{2(2)}h^2\tau^{-(k_2'+2\varphi)}, p > p_c, \tau \gg \Delta; \quad (18)$$

$$C_{(2)}^e = C_{2(2)}\tau^{-k_2'} + C_{1(2)}h^2\tau^{-(k_2+2\varphi)}, \\ p < p_c, \quad |\tau| \gg \Delta; \quad (19)$$

$$C_{(2)}^e = C_{1(2)}\tau^{-k_2/\varphi} + C_{2(2)}h^2\tau^{k_2'/\varphi}, \\ p < p_c, \quad |\tau| \leq \Delta; \quad (20)$$

где k_2 и k_2' — критические индексы $1/f$ шума.

В отличие от выражений для $\sigma^e(1)$, (2) вторые слагаемые в (18) и (19) не являются поправками к первым. Это связано с тем, что отношение $C_{2(2)}/C_{1(2)}$ в отличие от $h=\sigma_2/\sigma_1$, которое в перколяционном случае всегда много меньше единицы, может принимать любое значение.

Необходимо заметить, что в $C_{(2)}^e$ и в высших моментах $C_{(n)}^e$ присутствуют также и аналогичные σ^e поправки порядка $h|\tau|^\varphi$. Так, первое слагаемое в (18), если им не пренебрегать, выглядит так:

$$C_{1(2)}^e\tau^{-k_2} = (N_1 + N_2 h \tau^{-\varphi} + \dots), \quad (21)$$

где N_1 — константы порядка единицы.

Аналогичные добавки имеют место и для остальных слагаемых. Мы их опускаем, поскольку аналогично ситуации с величиной σ^e их значение вне области размазки много меньше единицы.

Выражения для $b_{1(2)}^e$, получаемые заменой переменных (17) в (18)–(20), были приведены в [9].

3. Эффективная проводимость слабо нелинейной среды выше порога протекания при $\sigma_2=0$. Как хорошо известно [3, 16], выше порога протекания при $\sigma_2=0$ (ток проводит только «металлическая» фаза, током, протекающим по плохо проводящей фазе, можно пренебречь) структура

проводящего кластера представляет так называемые бобы (систему параллельных связей) и так называемые единично соединенные связи (single connected bonds — SCB), на которых падает практически все приложенное к образцу напряжение. Такая простая структура, имеющаяся только вблизи p_c позволяет воспользоваться аналогией между $b_{(2)}^e$ и $b_{(2)}^e$, так как падение напряжения на SCB не будет зависеть от конкретного вида $b_1(\mathbf{E})$ нелинейности в локальном законе (5). Это падение напряжения будет точно таким же, как и в линейной задаче.

Таким образом, для определения $b_{(n)}^e$ достаточно знать n -е моменты $C_{(n)}^e$. Критическое поведение n -х моментов поля вблизи порога протекания изучалось во многих работах [13, 17, 18, 19]. Выше порога протекания при $h=0$

$$C_{(n)}^e = C_{1(n)}\tau^{-k_n}, \quad p > p_c, \quad \sigma_2=0, \quad (22)$$

Для дальнейшего существенно, что как и численное моделирование [13, 17, 18], так и анализ на основе моделей перколяционной структуры [19] дают линейную зависимость k_n от n . Согласно [19]

$$k_n = (2\nu(d-1) - t)(n-1). \quad (23)$$

Используя аналогию (17) из (12), получаем

$$b^e(\langle \mathbf{E} \rangle) = \sum_{n=1} b_{1(n)}^e |\langle \mathbf{E} \rangle|^{2(n-1)},$$

$$b_{1(n)} = b_{1(n)} = b_{1(n)}\tau^{-u_n}, \quad p > p_c, \quad (24)$$

где согласно (23)

$$u_n = nt - k_n = t + 2(n-1)(t - \nu(d-1)). \quad (25)$$

Заметим, что линейная зависимость k_n от n (21) дает возможность получить b^e в замкнутом виде, т.е. выразить эффективный коэффициент не через коэффициенты разложения, а непосредственно через функцию $b_1=b_1(x)$, задающую нелинейный локальный закон. Используя то, что ряд (24) с точностью до обозначений совпадает с рядом (6), проведем его формальное суммирование:

$$b^e(\langle \mathbf{E} \rangle) = \tau^t b_1(\tau^{-\nu(d-1)} \langle \mathbf{E} \rangle). \quad (26)$$

Из (26) следует, что эффективный коэффициент b^e выше p_c непосредственно выражается через функцию $b_1(x)$, причем аргументом служит комбинация $\tau^{-\nu(d-1)} \langle \mathbf{E} \rangle$.

4. Эффективная проводимость слабо нелинейной среды ниже порога протекания при $\sigma_1=\infty$. Аналогично предыдущему случаю при $p < p_c$ и $\sigma_1=\infty$, т.е. в том случае, когда можно пренебречь падением напряжения на хорошо проводящей фазе, можно получить замкнутое выражение для b^e . В этом случае все напряжение, приложенное к образцу, падает на так называемые single disconnected bonds (SDCB) [20, 21, 22],

совокупность которых образует прослойку из плохо проводящей фазы. Падение напряжения на прослойке не зависит от величины коэффициентов $b_{2(n)}$ в разложении (6) и совпадает с падением напряжения на прослойке в линейной задаче. Используя аналогию (17) и выражение $C_{(n)}^e$ ниже порога протекания [19]

$$C_{(n)}^e = C_{2(n)} \tau^{-k_n}, \quad p < p_c, \quad \sigma_1 = \infty, \quad (27)$$

где

$$k_n' = (2\nu - q)(n - 1), \quad (28)$$

для $b^e(\langle E \rangle)$ получаем

$$b^e(\langle E \rangle) = |\tau|^{-q} b_2(|\tau|^{-\nu} \langle E \rangle). \quad (29)$$

Заметим, что в отличие от $b^e(\langle E \rangle)$ при $p > p_c$ (26) аргументом функции $b_2(x)$ служит не $|\tau|^{t-\nu(d-1)} \langle E \rangle$, а $|\tau|^{-\nu} \langle E \rangle$.

Существует, по крайней мере, еще один случай, для которого можно получить замкнутое выражение — случай, когда, например, малость $h = \sigma_2/\sigma_1 \ll 1$ много меньше параметра малости, по которому происходит разложение слабо нелинейной проводимости $b_i(E)$ (6).

5. Эффективная проводимость слабо нелинейной среды в случае конечного отношения проводимостей фаз. Учет конечного отношения проводимости фаз в линейном случае в первом приближении по $h = \sigma_2/\sigma_1$, означает учет вторых слагаемых в величинах σ^e , определенных по (1) и (2). В перколяционной структуре основные элементы, определяющие σ^e , теперь как выше, так и ниже порога протекания должны одновременно включать как мостик, так и прослойку [7, 19, 23, 24] — рисунок. Вообще говоря, если мы хотим учесть m слагаемых в (1), (2), необходимо использовать m -ю ступень иерархии, а не изображенную на рисунке вторую ступень. Здесь, однако, рассмотрим случай очень сильной неоднородности $h^{-1} \gg 1$, такой, что учет следующих ступеней иерархии (рисунок) оказывает меньше влияние, чем учет нелинейности.

Ограничиваясь второй ступенью иерархии по h , заметим, что при $p > p_c$ (см. рисунок, а) все напряжение, приложенное к системе, падает на последовательно соединенных мостике и прослойке, причем его величина не зависит от вида локальной нелинейности, т.е. от конкретного вида функции $b_i(E)$, и совпадает с величиной падения

напряжения в линейной задаче определения $C_{(n)}^e$ при $h \neq 0$. Используя аналогию (17) и выражение для $C_{(n)}^e$ при $p > p_c$ [19]

$$C_{(n)}^e = C_{1(n)} \tau^{-k_n} + C_{2(n)} h^n \tau^{-(k_n + n\varphi)}, \quad (30)$$

для $b^e(\langle E \rangle)$ получаем

$$b^e(\langle E \rangle) = \tau^t b_1(\tau^{t-\nu(d-1)} \langle E \rangle) + \tau^{-q} b_2(\tau^{-\nu} \langle E \rangle), \quad p > p_c. \quad (31)$$

Ниже порога протекания значение падения напряжения на мостике и прослойке (см. рисунок, б) зависит от величины их сопротивлений и, тем самым, от конкретного вида нелинейности. Поэтому схему, приводящую к замкнутому выражению для проводимости системы, необходимо изменить. Заметим, что при $p < p_c$ в отличие от напряжения ток, проходящий через мостик и прослойку, один и тот же и не зависит (в приближении двух ступеней иерархии) от вида нелинейности. Таким образом, при $p < p_c$ удобно работать в терминах токов и нелинейных сопротивлений.

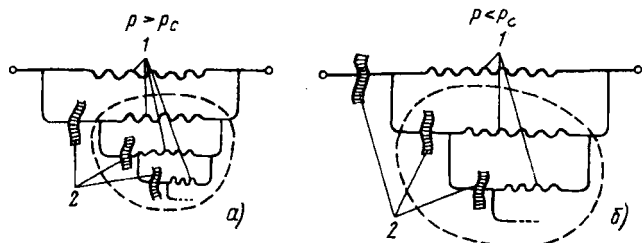
Записывая аналогично (5) и (6) $E(r) = a(j(r))j(r)$ и $a_i(j) = \sum_{n=1} a_{1(n)} |j|^{2(n-1)}$ и используя

выражения для n -х моментов токов аналогию между моментами и эффективными нелинейными коэффициентами, а также проводя формальное суммирование, получаем замкнутое выражение для $a^e(\langle j \rangle)$:

$$a^e(\langle j \rangle) = |\tau|^q a_2(|\tau|^{q-\nu} \langle j \rangle) + |\tau|^{-t} \times \\ \times a_1(|\tau|^{-\nu(d-1)} \langle j \rangle). \quad (32)$$

Анализируя (31) и (32), можно заметить, что выше порога протекания при приближении к p_c при $|\langle E \rangle| = \text{const}$ аргумент функции $b_2(\tau^{-\nu} \langle E \rangle)$ (31) растет, а $b_1(\tau^{t-\nu(d-1)} \langle E \rangle)$ падает. Это означает, что при $p \rightarrow p_c$ в $b^e(\langle E \rangle)$ все большую роль будет играть нелинейность второй фазы. Ниже порога протекания при $|\langle j \rangle| = \text{const}$ наоборот — при $p \rightarrow p_c$ все большую роль в $a^e(\langle j \rangle)$ будет играть первая фаза. Эти выводы согласуются с качественными соображениями. В первом случае ($p > p_c$) при $|\langle E \rangle| = \text{const}$ приложенная к среде разность потенциалов $\Delta\varphi$ растет как $\tau^{-\nu}$, так как при $\tau \rightarrow 0$ растет корреляционный размер $\xi \sim |\tau|^{-\nu}$. На прослойке падает вся разность потенциалов $\Delta\varphi \sim |\langle E \rangle| \xi$, поэтому напряженность поля на прослойке $|E_2| \sim \Delta\varphi/a_0 \sim |\langle E \rangle| |\tau|^{-\nu}$, т.е. растет при $\tau \rightarrow 0$. Напряженность же поля на мостике $|E_1| \sim \Delta\varphi/l_1$, где $l_1 \sim \tau^{-t+\nu(d-2)}$ — длина мостика и следовательно $|E_1| \sim |\langle E \rangle| \tau^{t-\nu(d-1)}$, т.е. напряженность падает при $p \rightarrow p_c$.

6. Соотношения взаимности для нелинейных сред. Существует класс сред — среды Дыхне [6], для которых можно получить точные соотношения для линейных эффективных прово-



димостей — двумерные двухфазные среды с геометрически эквивалентным в среднем расположении фаз на пороге протекания. Последнее означает, что взаимная замена проводимостей фаз не изменит эффективной проводимости. При $p \neq p_c$ для таких сред было получено [6] так называемое соотношение взаимности

$$\sigma^e(p) \sigma^e(1-p) = \sigma_1 \sigma_2, \quad (33)$$

где $\sigma^e(p)$ — проводимость среды с концентрацией хорошо проводящей фазы p ; $\sigma^e(1-p)$ — той же среды после взаимной замены локальных проводимостей фаз. При этом, так как в таких средах $p_c = 1/2$, одна фаза находится выше p_c на Δp , другая ниже на то же значение Δp .

Применим метод работы [6] к нелинейной среде с законом:

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \chi(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \eta(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^4 \mathbf{E}(\mathbf{r}),$$

$$b_2(\mathbf{r}) = \chi(\mathbf{r}), \quad b_3(\mathbf{r}) = \eta(\mathbf{r}), \quad (34)$$

где в этом пункте, чтобы не загромождать изложение, константа, характеризующая кубическую нелинейность, обозначена χ , нелинейность пятой степени — η .

Проведем в (34) замену полей и токов согласно [6]:

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}) = \Lambda \mathbf{n} \times \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \Lambda^{-1} \mathbf{n} \times \tilde{\mathbf{j}}(\mathbf{r}), \quad (35)$$

где \mathbf{n} — единичный вектор нормали к плоскости, в которой расположена среда; $\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r})$ и $\tilde{\mathbf{j}}(\mathbf{r})$ — индукции поля и токи во взаимной (к основной) среде, подчиняющиеся, как легко показать, тем же уравнениям $\text{rot } \tilde{\mathbf{E}}, \text{div } \tilde{\mathbf{j}} = 0$, что и \mathbf{E}, \mathbf{j} ; Λ — некоторая константа.

При подстановке (35) в (34) получаем новый закон, связывающий поля и токи во взаимной среде:

$$\tilde{\mathbf{j}}(\mathbf{r}) = \tilde{\sigma}(\mathbf{r}) \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) + \tilde{\chi}(\mathbf{r}) |\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r})|^2 \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) + \tilde{\eta}(\mathbf{r}) |\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r})|^4 \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}); \quad (36)$$

где

$$\tilde{\sigma}(\mathbf{r}) = \Lambda^2 / \sigma(\mathbf{r}), \quad \tilde{\chi}(\mathbf{r}) = -\chi(\mathbf{r}) \Lambda^4 / \sigma^4(\mathbf{r}),$$

$$\tilde{\eta}(\mathbf{r}) = 3\chi^2(\mathbf{r}) \Lambda^6 / \sigma^7(\mathbf{r}) - \eta(\mathbf{r}) \Lambda^6 / \sigma^6(\mathbf{r}); \quad (37)$$

выражение (36) записано с точностью до пятой степени по полю членов включительно.

Потребуем, как и в [6], чтобы взаимная (со знаком тильды) среда совпадала с изначальной при взаимной замене в ней значений фаз $\sigma_1 \leftrightarrow \sigma_2, \chi_1 \leftrightarrow \chi_2, \eta_1 \leftrightarrow \eta_2$. Тогда из (37) следует:

$$\Lambda = \sqrt{\sigma_1 \sigma_2}; \quad \chi_1 / \chi_2 = -(\sigma_1 / \sigma_2)^2;$$

$$\eta_{1,2} = (\sigma_{1,2} / \sigma_{2,1})^3 (3\chi_{2,1}^2 / \sigma_{2,1} - \eta_{2,1}). \quad (38)$$

Поскольку фазы двумерной среды на пороге протекания находятся в среднем в геометрически

эквивалентном положении, их взаимная замена не приведет к изменению эффективных значений. Это означает, что $\sigma^e = \tilde{\sigma}^e, \chi^e = \tilde{\chi}^e$, и $\eta^e = \tilde{\eta}^e$. Тогда, делая замену, аналогичную (35), но для средних по объему полей и токов $\langle \mathbf{j} \rangle = \Lambda \mathbf{n} \times \langle \tilde{\mathbf{E}} \rangle$, $\langle \mathbf{E} \rangle = \Lambda^{-1} \mathbf{n} \times \langle \tilde{\mathbf{j}} \rangle$, $\langle \mathbf{j} \rangle = \sigma^e \langle \mathbf{E} \rangle + \chi^e \langle |\mathbf{E}|^2 \rangle \langle \mathbf{E} \rangle + \eta^e \langle |\mathbf{E}|^4 \rangle \langle \mathbf{E} \rangle$ вместо (37) получим:

$$\tilde{\sigma}^e = \Lambda^2 / \sigma^e; \quad \tilde{\chi}^e = -\chi^e \Lambda^4 / (\sigma^e)^4;$$

$$\tilde{\eta}^e = 3(\chi^e)^2 \Lambda^6 / (\sigma^e)^7 - \eta^e \Lambda^6 / (\sigma^e)^6. \quad (39)$$

Первое из выражений (39) даст хорошо известное выражение. Дыхне для эффективной электропроводимости двумерной среды на пороге протекания: $\sigma^e = \sqrt{\sigma_1 \sigma_2}$ [6], второе и третье из выражений (39) можно удовлетворить только при $\chi^e = 0, \eta^e = 0$. Таким образом, метод работы [6] позволяет получить точное решение задачи об эффективных свойствах слабо нелинейной среды $\sigma^e = \sqrt{\sigma_1 \sigma_2}$ и $\chi^e = 0, \eta^e = 0$ для одного, определенного, случая набора значений коэффициентов фаз (38). Константы и знаки в этих соотношениях приводят к взаимной компенсации нелинейностей, вносимых в эффективные свойства каждой из фаз. Для χ^e соотношения взаимности были получены в [25].

Общие условия, при которых в двумерных локально нелинейных средах на пороге протекания эффективные свойства линейны, даны в [26].

«Жесткие» условия (38) приводят к взаимной компенсации нелинейности фаз — эффективная проводимость среды при вычислении (38) линейна, что снижает ценность такого решения. Однако кроме эффективных коэффициентов при $p = p_c$ в статье [6] получены соотношения взаимности. Обобщение их на нелинейный случай менее «жестко» и не требует линейной эффективной проводимости.

При $p \neq p_c$ уже $\sigma^e \neq \tilde{\sigma}^e, \chi^e \neq \tilde{\chi}^e$ и $\eta^e \neq \tilde{\eta}^e$, и вместо (38) имеем:

$$\tilde{\sigma}^e(p) = \sigma_1 \sigma_2 / \sigma^e(p), \quad \tilde{\chi}^e(p) = -\chi^e(p) (\sigma_1 \sigma_2)^2 / (\sigma^e(p))^4,$$

$$\tilde{\eta}^e(p) = (3(\chi^e(p))^2 / \sigma^e(p) - \eta^e(p)) \times$$

$$\times (\sigma_1 \sigma_2)^3 / (\sigma^e(p))^6. \quad (40)$$

В случайно неоднородных средах замена $p \rightarrow (1-p)$ переводит взаимную (со знаком тильды) среду, полученную преобразованиями (35), в изначальную $\sigma^e(1-p) = \tilde{\sigma}^e(p), \chi^e(1-p) = \tilde{\chi}^e(p), \eta^e \times (1-p) = \tilde{\eta}^e(p)$. Таким образом, из (40) следуют соотношения взаимности:

$$\left. \begin{aligned} \sigma^e(1-p) &= \sigma_1 \sigma_2 / \sigma^e(p), \\ \chi^e(1-p) &= -\chi^e(p) (\sigma_1 \sigma_2)^2 / (\sigma^e(p))^4; \\ \eta^e(1-p) &= (3(\chi^e(p))^2 / \sigma^e(p) - \eta^e(p)) \times \\ &\times (\sigma_1 \sigma_2)^3 / (\sigma^e(p))^6. \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Первое из выражений (41) совпадает с выражением Дыхне для линейного случая. Второе

и третье выражения — нелинейные соотношения, можно использовать для проверки полученных выше универсальных выражений эффективной нелинейной проводимости.

Действительно, воспользовавшись (31) и (32) и соотношениями (38) для $d=2$ ($t=q$) в пренебрежении слагаемыми высшего порядка малости, получаем эффективные константы σ^e , χ^e и η^e :

$$\sigma^e(p) \approx \sigma_1 \tau^t, \quad \chi^e(p) \approx \chi_2 (\sigma_1/\sigma_2)^2 \tau^{3t-2\nu(d+1)}, \\ \eta^e(p) \approx \eta_1 \tau^{5t-4\nu(d+1)}, \quad p > p_c; \quad (42)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma^e(1-p) &\approx \sigma_2 |\tau|^{-q}, \quad \chi^e(1-p) \approx \chi_2 |\tau|^{-q-2\nu}; \\ \eta^e(1-p) &\approx (\sigma_2/\sigma_1)^3 (3\chi_1^2/\sigma_1 - \eta_1) |\tau|^{-q-4\nu}, \quad p < p_c. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Легко видеть, что подстановка (42) и (43) в соотношения взаимности (41) приводит к тождествам.

Заключение. Для слабо нелинейной ВАХ локальной проводимости двухфазной среды вблизи порога протекания получены универсальные выражения для эффективных коэффициентов. Выше порога протекания (31)

$$b^e(\langle E \rangle) = \tau^t b_1(\tau^{-\nu(d-1)} \langle E \rangle) + \tau^{-q} b_2(\tau^{-\nu} \langle E \rangle), \\ p > p_c, \quad (44)$$

где $b_1(x)$ и $b_2(x)$ — функции, задающие нелинейность ВАХ первой и второй фаз.

Строго говоря, выражение для $b^e(\langle E \rangle)$ справедливо при $h=0$, т.е. при $b_2=0$, однако с указанной выше точностью его можно использовать и при $h \neq 0$.

Ниже порога протекания найдено универсальное выражение для обратного к $b^e(\langle E \rangle)$ эффективного коэффициента (29) $a^e(\langle j \rangle)$:

$$a^e(\langle j \rangle) = |\tau|^q a_2(|\tau|^{q-\nu} \langle j \rangle) + |\tau|^{-t} \times \\ \times a_1(|\tau|^{-\nu(d-1)} \langle j \rangle), \quad p < p_c, \quad (45)$$

где, как и выше, строго говоря, выражение для $a^e(\langle j \rangle)$ справедливо при $h=0$, т.е. при $a_1=0$. Однако с указанной выше точностью его можно использовать и при $a_1 \neq 0$. В статье рассмотрен случай нелинейности, когда функции $b_i(x)$ и $a_i(x)$ слабо зависят от x — разложимы в степенной ряд вблизи $x=0$.

Работа частично поддержана РФФИ 95-02-04432а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu.K.W., Hui P.M. Percolation effects in two-component non-linear components: Crossover from linear to non-linear behaviour. — Phys. Rev. B, 1994, vol. 50, № 18.
2. Zhang X., Stroud D. Numerical studies of the non-linear properties of composites. — Phys. Rev. B, 1994, vol. 49, № 2.
3. Stauffer D. and Aharony A. Introduction to Percolation Theory. — 2nd ed. — London: Taylor & Francis, 1992.
4. Efros A.L., Shklovskii B.L. Critical behaviour of conductivity and dielectric constant near the metal-non metal transition threshold — Phys. Status. Solidi B, 1976, vol. 76, № 2.
5. The electrical conductivity of binary disordered systems.

- percolation clusters, fractal and related models / J.P. Clerc, G. Giraud, J.M. Laugier, J.M. Luck. Adv.Phys., 1990, vol. 39, № 3.
6. Дыхне А.М. Проводимость двумерной двухфазной системы. — ЖЭТФ, 1970, т. 59, № 7.
7. Морозовский А.Е., Снарский А.А. Критическое поведение $1/f$ шума в перколяционных системах. — ЖЭТФ, 1989, т. 95, № 5.
8. Stroud D., Hui P.M. Nonlinear susceptibilities of granular matter. — Phys. Rev. B, 1988, vol. 37, № 15.
9. Levy O., Bergman D.J. Critical behaviour of the weakly non-linear conductivity and flicker noise of two-component composites. — Phys. Rev. B, 1994, vol. 50, № 6.
10. Балагуров Б.Я. Гальваномагнитные свойства неоднородных сред в слабом магнитном поле. — ЖЭТФ, 1987, т. 93, № 5, вып. 11.
11. Enhanced non-linear response of fractal clusters. / K.M. Yu, Chan Eliza M.Y., Y.C. Chu, G.Q. Gu — Phys. Rev. B, 1995, vol. 51, № 17.
12. Rammal R., Tannous C., Tremblay A.-M.S. $1/f$ noise in random resistor networks: Fractal and percolating systems. — Phys. Rev. A, 1985, vol. 31, № 4.
13. Arcangelis, S. Redner, A. Coniglio. Anomalous voltage distribution of random resistor networks and a new model for the backbone at the percolation threshold. — Phys. Rev. B, 1985, vol. 31, № 7.
14. Пенфилд П., Спейс Р., Дюникер С. Энергетическая теория электрических цепей. — М.: Энергия, 1974.
15. Tremblay R.R., Albinet G., Tremblay A.-M.S. Noise and crossover exponent in the two-component random resistor network. — Phys. Rev. B, 1991, vol. 43, № 13.
16. Скал А.С., Шкловский Б.И. Топология бесконечного кластера в теории протекания и теория прыжковой проводимости. — ФТП, 1974, т. 8, вып. 5.
17. Elicker (1/f) noise in percolation networks: a new hierarchy of exponents / R. Rammal, C. Tannous, P. Breton, A.-M.S. Tremblay. — Phys. Rev. Lett., 1985, vol. 54, № 15.
18. Albinet G., Tremblay R.R., Tremblay A.-M.S. Scaling behaviour of multifractal moment distributions near critically. — J. Phys. 1993, vol. 3, № 2.
19. Морозовский А.Е., Снарский А.А. Мультискейлинг в случайно неоднородных средах: эффективная проводимость, относительная спектральная плотность $1/f$ шума и следующие моменты. — ЖЭТФ, 1992, т. 102, № 2, вып. 8.
20. Дубров В.Е., Левинштейн М.Е., Шур М.С. Аномалия диэлектрической проницаемости при переходе металл-диэлектрик. Теория и моделирование. — ЖЭТФ, 1976, т. 70, № 5.
21. Coniglio A., Stanley H.E. Screening of deeply invaginated clusters and the critical behaviour of the random superconducting network. — Phys. Rev. Lett., 1984, vol. 52, № 2.
22. Wright D.C., Bergman D.J., Kantor Y. Resistance fluctuations in random resistor network above and below the percolation threshold. — Phys. Rev. B, 1986, vol. 33, № 1.
23. Morozovsky A.E., Snarskii A.A. Critical behaviour of fracture stresses in randomly inhomogeneous composites near percolation threshold. — JETP Lett., 1990, vol. 52, № 4.
24. $1/f$ noise in percolation and percolationlike systems / A.A. Snarskii, A.E. Morozovsky, A. Kolek, A. Kusy. — Phys. Rev. E 1996, vol. 53, № 6.
25. Снарский А.А., Томчук П.М. Кинетические явления в макроскопически неоднородных анизотропных средах. — Укр. Физ. Ж. 1987, т. 32, № 1.
26. Бердический В.Л. Вариационные принципы механики сплошной среды. — М.: Наука, 1983.

[25.08.97]

А в т о р ы: Снарский Андрей Александрович окончил физический факультет Черновицкого государственного университета в 1972 г. по специальности «Физика полупроводников». В 1991 г. в Институте физики НАН Украины защитил докторскую диссертацию по теме «Кинетические явления в макроскопически неоднородных и анизотропных средах». Профессор кафедры общей и теоретической физики Национального технического университета (ранее КПИ), Украина.

Буда Сергей Иванович окончил физический факультет Черновицкого государственного университета в 1994 г. по специальности «Физика твердого тела». Аспирант кафедры общей и теоретической физики Национального технического университета, Украина.

О математических моделях трансформаторов

(статья Китаева А.В., «Электричество», 1997, № 7)

НЕТУШИЛ А.В.

Основной ошибкой обсуждаемой статьи является ее название «Точку в споре о формах записи уравнений трансформатора должен поставить эксперимент», соответствующим образом отразившейся и на ее содержании. Связан ли какой-либо выбор условно положительного направления в схемах электрических цепей с истинными мгновенными направлениями токов и напряжений?

На этот вопрос можно ответить только отрицательно. Даже сам термин «условно положительное направление» свидетельствует об условном характере этого направления, которое никак не отражает истины.

Ошибочность этого утверждения является следствием второй ошибки автора, которая сводится к его незнанию со статьями, ранее опубликованными в дискуссии. Если ознакомиться со списком дискуссионных статей и с текстом его статьи, то обращает на себя внимание незнание автора с той дискуссией, которая велась в журнале «Электричество»: ранее — в 1988 г., в частности со статьей Г.С.Тамояна «О сис-

темном подходе к преподаванию электрических дисциплин» («Электричество», 1988, № 5), в которой дается сравнение различных подходов к выбору условно положительных направлений в цитируемой отечественной и зарубежной литературе. Также огорчает незнание участника дискуссии с ответом автора, приведенном в журнале «Электричество» № 7 за 1997 г.

[29.10.97]

Автор: Нетушил Анатолий Владимирович окончил в 1937 г. факультет электромашиноаппаратостроения Московского энергетического института (МЭИ). В 1953 г. ему была присвоена степень доктора технических наук за исследования, связанные с расчетом полей при высокочастотном нагреве неметаллических материалов. Профессор кафедры электротехники, электроники и микропроцессорной техники Московской государственной академии тонкой химической технологии.

От редакции

Публикуя данную заметку А.В. Нетушила, редакция полагает исчерпанной затронутую в дискуссии по методике изложения вопросов математического моделирования трансформаторов в электротехнической литературе (Н.И. Булгакова, 1984, № 1; И.В. Антик, 1985, № 11; А.В. Нетушил 1986, № 5; С.Ю. Масекас, 1987, № 7; Е.С. Траубе, 1987, № 8; Т.Е. Тамоян, 1988, № 5; А.В. Нетушил, 1988, № 7; К.Ф. Фаттахов, 1995, № 2; Ли Цзылян, Чань Вэй, 1995, № 5; М.Е. Алпатов, 1996, № 3; Г.П. Лычкина, 1996, № 5; поправка редакции к статье Лычкиной Г.П., 1996, № 9; А.В. Китаев, 1997, № 7) тему выбора условно положительных направлений токов и напряжений и благодарит всех участников ее обсуждения. Хорошее освещение в материалах дискуссии получила и перспектива использования в этой методике положений теории четырехполюсников. Вместе с этим редакция вынуждена отметить, что многие важные вопросы моделирования трансформаторов, касающиеся их диагностики, идентификации, учета нелинейных свойств, остались за рамками обсуждения и требуют его продолжения.

От Академии электротехнических наук Российской Федерации

25 февраля 1998 г. исполняется 5 лет со дня учреждения Академии электротехнических наук Российской Федерации (АЭН РФ). Она объединяет в своем составе 463 крупнейших ученых и специалистов в области электротехники, электроэнергетики, электроники и вычислительной техники, в том числе более 30 академиков и членов-корреспондентов Российской Академии наук, а также около 150 электротехнических научно-промышленных объединений, организаций и предприятий — коллективных членов АЭН РФ. Индивидуальные члены АЭН РФ и представители коллективных членов распределены по 14 научно-отраслевым отделениям Академии.

АЭН РФ, являющаяся преемницей созданного в конце прошлого века сообщества российских электротехников, зарегистрирована в 1993 г. Министерством юстиции в качестве высшей в своей области научно-технической организации с общероссийским статусом.

Ниже публикуется полный состав индивидуальных членов Академии электротехнических наук РФ.

Президиум АЭН РФ

Герасимов В.Г. — президент
Петленко Б.И. — первый вице-президент
Альтов В.А. — вице-президент, президент Международной академии электротехнических наук
Вершинин Ю.Н. — вице-президент, член-корреспондент РАН
Пешков И.Б. — вице-президент, председатель Научно-промышленного совета АЭН РФ
Иванченко Г.Е. — главный ученый секретарь
Аверин С.И. — академик-секретарь
Бортник И.М. — академик-секретарь
Васильев А.С. — академик-секретарь
Винокуров В.А. — член президиума
Воронин Г.П. — академик-секретарь
Голубков А.С. — академик-секретарь
Демирчян К.С. — академик-секретарь, академик РАН
Дьяков А.Ф. — академик-секретарь, президент Международной энергетической академии, член-корреспондент РАН

Емельянов С.В. — член президиума, академик-секретарь РАН
Леонов Б.И. — член президиума, президент Российской медико-технической академии
Нетушил А.В. — председатель Экспертного совета
Попов А.И. — академик-секретарь
Приймак А.А. — академик-секретарь
Сарапулов Ф.Н. — член президиума
Свалов Г.Г. — академик-секретарь
Сычев В.В. — зам. председателя Экспертного совета
Фаворский О.Н. — член президиума, академик-секретарь РАН

В состав Академии электротехнических наук Российской Федерации входят следующие члены Российской Академии наук:

Вице-президент РАН — Месяц Г.А.

Академики РАН

Глебов И.А.
Глухих В.А.
Данилевич Я.Б.
Демирчян К.С.
Евтихийев Н.Н.
Емельянов С.В.
Журавлев Ю.И.
Маслов В.П.
Новиков И.И.
Тиходеев Н.Н.
Фаворский О.Н.
Цыпкин Я.З.
Шереметьевский Н.Н.

Члены-корреспонденты РАН

Александров Г.Н.
Батенин В.М.
Биберман Л.М.
Вершинин Ю.Н.
Диденко А.Н.
Дьяков А.Ф.
Клюев В.В.
Коровин С.К.
Костенко М.В.
Лидоренко Н.С.
Мешков И.Н.
Мизин И.А.
Мокеров В.Г.

Пешехонов В.Г.
Савин Г.И.
Соломенцев Ю.М.
Филиппов Г.А.
Чубраева Л.И.

Почетные члены АЭН РФ

Александров Н.В.
Антонов А.К.
Баранов А.П.
Бессонов Л.А.
Вилесов Д.В.
Глазенов Т.А.
Иванов-Смоленский А.В.
Исаев И.П.
Кавалеров Г.И.
Кадомянская К.П.
Ключев В.И.
Конев Ю.И.
Кононенко Е.В.
Константинов В.Г.
Копылов И.П.
Кучинский Г.С..
Ларионов В.П.
Литвинов-Лунц В.С.
Мамиконянц Л.Г.
Михайлов А.К.
Наяшков И.С.
Пятин Ю.М.
Рекус Г.Г.
Рохлин Г.Н.
Свечарник Д.В.
Серов В.И.
Слежановский О.В.
Тареев Б.М.
Татур Т.А.
Трембач В.В.
Троп А.Е.
Филиппова Т.А.
Фотин В.П.
Хрущев В.В.
Чебан В.М.
Юньков М.Г.
Юринов В.М.

Научно-отраслевое отделение № 1.

Теоретическая электротехника

Академик-секретарь — Демирчян К.С.

Действительные члены АЭН РФ

Богуславский И.З.
Бондаренко А.В.
Боронин В.Н.
Бутырин П.А.
Киншт Н.В.
Миронов В.Г.
Новиков О.Я.
Пищиков В.И.
Чечурин В.Л.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Аветисян Д.А.
Алексейчик Л.В.
Белавин В.А.
Бычков Ю.И.
Воронин П.А.
Инкин А.И.
Кузнецов И.Ф.
Кузовкин В.А.
Новгородцев А.Б.
Перфильев Ю.С.
Попов А.П.
Шакиров М.А.
Шмелев С.К.

Научно-отраслевое отделение № 2.

Электроэнергетика

Академик-секретарь — Дьяков А.Ф.

Действительные члены АЭН РФ

Баринев В.А.
Верещагин И.П.
Виссарионов В.И.
Воропай Н.И.
Гамм А.З.
Гераскин О.Т.
Засыпкин А.С.
Максимов Б.К.
Неклепаев Б.Н.
Платонов В.В.
Смоловик С.В.
Строев В.А.
Ушаков В.Я.
Цветков В.А.
Шакарян Ю.Г.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Белкин Г.С.
Богатырев Л.Л.
Брызгалов В.И.
Ванин В.К.
Гайтов Б.Х.
Евдокунин Г.А.
Елистратов В.В.
Затопляев Б.С.
Китушин В.Г.
Коротков Б.А.
Кушнарев Ф.А.
Левченко И.И.
Малинин Н.К.
Розанов М.Н.
Романов А.А.
Рубисов Г.В.
Савельев В.А.
Тарасов В.И.
Ушаков Е.И.
Федоров В.К.
Хайруллин Р.Г.
Цгоев Р.С.
Целебровский Ю.В.

Червонный Е.М.
Черепанов В.В.

Научно-отраслевое отделение № 3.
Электромеханика и силовая преобразо-
вательная техника в промышленности
Академик-секретарь — Попов А.И.

Действительные члены АЭН РФ

Беспалов В.Я.
Боровиков М.А.
Браславский И.Я.
Булатов О.Г.
Быков Ю.М.
Гладышев С.П.
Гуров А.А.
Гусельников Э.М.
Иванов Г.М.
Ильинский Н.Ф.
Ковалев Ф.И.
Кочетков В.Д.
Лазарев И.А.
Онищенко Г.Б.
Поздеев А.Д.
Попов В.В.
Розанов Ю.К.
Сарапулов Ф.Н.
Сипайлов Г.А.
Стома С.А.
Усов Н.Н.
Шулаков Н.В.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Ахунов Т.А.
Брянцев А.М.
Воронин С.Г.
Дерменжи П.Г.
Еременко В.Г.
Зиновьев Г.С.
Ивашин В.В.
Коськин Ю.П.
Кубарев Л.П.
Мещеряков В.М.
Пластун А.Т.
Подаруев А.И.
Попов В.И.
Потапов Л.А.
Рассудов Л.Н.
Сарычев А.П.
Суворов Н.И.
Тарасов В.Н.
Тубис Я.Б.
Хватов С.В.
Хохлов Ю.И.
Чванов В.А.
Шевченко В.В.
Шиянов А.И.
Шоффа В.Н.
Ютландов Ю.Д.

Научно-отраслевое отделение № 4.
Электротехнические системы и устройства
общего и специального назначения
Академик-секретарь — Иванченко Г.Е.

Действительные члены АЭН РФ

Гольдберг О.Д.
Динкель А.Д.
Загороднюк В.Т.
Карелин В.Я.
Мамедов Ф.А.
Меньшов Б.Г.
Рульников А.А.
Щуцкий В.И.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Авилов В.Д.
Бургин Б.Ш.
Бухтояров В.Ф.
Васильев И.Е.
Гафиятуллин Р.Х.
Гурницкий В.Н.
Ершов М.С.
Казаков В.А.
Кольниченко Г.И.
Кондаков В.И.
Кузьмин В.А.
Сидельников Б.В.
Трегубов И.А.
Халин Е.В.
Хронусов Г.С.
Чиндяскин В.И.
Шошмин В.А.
Шпилевой В.А.

Научно-отраслевое отделение № 5.
Электротехнические системы транспорта
и космической техники

Академик-секретарь — Петленко Б.И.

Действительные члены АЭН РФ

Бут Д.А.
Бушенин Д.В.
Верещагин В.П.
Веселовский О.Н.
Винокуров В.А.
Грязнов Г.М.
Ивоботенко Б.А.
Иньков Ю.М.
Калявин В.П.
Карунин А.Л.
Купеев Ю.А.
Кучумов В.А.
Метелкин Б.А.
Пинский Ф.И.
Розанов А.В.
Сергеев А.Г.
Соустин Б.П.
Трещев И.И.
Трифонов Ю.В.
Фельдман Ю.И.

Щербаков В.Г.
Щербинин П.И.
Ютт В.Е.
Янышев Ю.А.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Аилов Р.С.
Акимов О.А.
Амелин В.М.
Аржанников Б.А.
Белов В.Ф.
Вейнберг Д.М.
Волков В.Д.
Глебов С.С.
Гордеев Г.И.
Гурьянов Д.И.
Елисеев В.Б.
Жарков В.Д.
Жемчугов Г.А.
Киреев Ю.Н.
Кислицын А.Л.
Колоколов Ю.В.
Копылов О.Г.
Кузнецов С.Е.
Кустарев Ю.С.
Лаптев Н.Н.
Леонов С.Н.
Мазнев А.С.
Мисиченко А.П.
Надоров В.П.
Оболенский Н.В.
Павленко В.И.
Покровский Г.П.
Самосейко В.Ф.
Скачков Ю.В.
Тазов Г.В.
Феоктистов В.П.
Чернышев А.И.
Чижек Ю.П.
Шаров С.Н.
Шипицын В.В.

Научно-отраслевое отделение № 6.

Электротехнология

Академик-секретарь — Васильев А.С.

Действительные члены АЭН РФ

Верхотуров А.Д.
Волохонский Л.А.
Дресвин С.В.
Миронов Ю.М.
Нетушил А.В.
Попов А.Н.
Рубцов В.П.
Столбов В.И.
Чередниченко В.С.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Архангельский Ю.С.
Каллистратов В.А.
Каримов А.Х.

Коровин Н.В.
Кручинин А.М.
Кувалдин А.Б.
Лебедев А.В.
Тимофеев В.Н.
Хотин В.А.
Шепель Г.А.

Научно-отраслевое отделение № 7.

**Средства и системы контроля,
управления и автоматизации**

Академик-секретарь — Герасимов В.Г.

Действительные члены АЭН РФ

Глудкин О.П.
Денель А.К.
Долкарт В.М.
Зорин Ю.Н.
Калашников М.А.
Камынин Ю.Н.
Ковалев Ю.З.
Колесников А.А.
Кутузов В.К.
Ларюшин А.И.
Недялков К.В.
Панфилов Д.И.
Первачев С.В.
Полянин К.П.
Сергеев В.Г.
Чудинов С.М.
Шатерников В.Е.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Абакумов А.А.
Ацюковский В.А.
Бурковский В.Л.
Винокур В.М.
Волович Г.И.
Голенищев-Кутузов В.А.
Гуров А.И.
Дробышев Г.Ф.
Желбаков И.Н.
Катанаев Н.Т.
Ковалев В.Д.
Курбатов П.А.
Малышенко А.М.
Мужицкий В.Ф.
Муслимов Р.А.
Никоренко Л.Л.
Передельский Г.И.
Покровский А.Д.
Пронин В.П.
Ромаш Э.М.
Ружников В.А.
Сухинин Б.В.
Федосенко Ю.К.
Шелихов Г.С.
Явленский А.К.

Научно-отраслевое отделение № 8.
Электротехнические материалы и изделия
Академик-секретарь — Свалов Г.Г.

Действительные члены АЭН РФ

Арзамасов В.Б.
Иванов В.Н.
Койков С.Н.
Мещанов Г.И.
Пешков И.Б.
Похолков Ю.П.
Сергеев В.В.
Филиков В.А.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Арсеньев П.А.
Беляев Р.А.
Боксимер Э.А.
Гроздов А.Г.
Левицкий Ю.Т.
Митин А.В.
Орданьян С.С.
Полонский Ю.А.
Рембеза С.И.
Финкель Э.Э.
Холодный С.Д.
Шульга И.Я.

Научно-отраслевое отделение № 9.
Электрофизические и сверхпроводящие
устройства

Академик-секретарь — Альтов В.А.

Действительные члены АЭН РФ

Бацких Г.И.
Близнюк В.А.
Васильев А.А.
Губанков В.Н.
Дашук П.Н.
Зенкевич В.Б.
Кейлин В.Е.
Михайлов В.Н.
Сычев В.В.
Фишер Л.М.
Шнеерсон Г.А.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Алиевский Б.Л.
Башкатов В.А.
Власов М.А.
Завьялов М.А.
Лебедев Е.Ф.
Лутидзе Ш.И.
Маевский В.А.
Мнацаканов Т.Т.
Рахманов А.Л.
Славин В.С.
Сытников В.Е.
Федоров В.М.
Шиков А.К.

Научно-отраслевое отделение № 10.
Высоковольтная электротехническая
и электронная аппаратура.

Электромагнитные излучения,
совместимость и экология

Академик-секретарь — Бортник И.М.

Действительные члены АЭН РФ

Айзенберг Ю.Б.
Атаев А.Е.
Бондалетов В.Н.
Булеков В.П.
Козлов В.Б.
Красиков Н.Н.
Матвеев А.Б.
Михайлов В.А.
Переводчиков В.И.
Шлифер Э.Д.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Бурман А.П.
Вишневский Ю.И.
Кокинов А.М.
Колечицкий Е.С.
Костроминов А.М.
Краснопольский А.Е.
Лейтес Л.В.
Литюшкин В.В.
Медведев В.Т.
Мезенин О.Л.
Покровский Ф.Н.
Сарычев Г.С.
Сенилов Г.Н.
Фоминич Э.Н.
Халилов Ф.Х.
Хузмиев И.К.
Шахпарунянц Г.Р.
Широков В.Л.

Научно-отраслевое отделение № 11.

Электроника и вычислительная техника

Академик-секретарь — Воронин Г.П.

Действительные члены АЭН РФ

Бородин Ю.И.
Кидалов В.И.
Несенюк Л.П.
Никольцев В.А.
Подоплекин Ю.Ф.
Селиванов А.С.
Шахнов В.А.

Члены-корреспонденты АЭН РФ

Закурдаев И.В.
Иванов Г.П.
Корякин Ю.А.
Кучук В.В.
Лисс А.Р.
Симановский И.В.
Фисун В.В.
Флоренцев С.Н.
Шунаев Н.А.

Анатолий Петрович Меренков

Скончался директор Сибирского энергетического института (СЭИ) СО РАН, член-корреспондент РАН Анатолий Петрович Меренков. Ушел из жизни видный ученый, талантливый организатор, известный в стране и за рубежом специалист в области системных исследований, моделирования и управления в энергетике, газовой отрасли и трубопроводных системах, действительный член Международной энергетической академии (МЭА), член Международной ассоциации энергетиков и экономистов (IAEE), автор более 150 научных работ. человек большой душевной щедрости и высокого чувства ответственности за отечественную науку.

А.П. Меренков родился 30 августа 1936 г. в Старом Осколе Белгородской области. В 1953 г. после окончания суворовского училища поступил в Московский государственный университет и закончил его с отличием в 1958 г. С 1958 по 1961 гг. он работал младшим научным сотрудником в Институте математики СО АН СССР в Новосибирске, а в 1961 г. по инициативе чл.-корр. АН СССР Л.А. Мелентьева стал заведующим лабораторией СЭИ в Иркутске. Здесь он проработал до 1983 г., защитив кандидатскую (1964 г.) и докторскую (1976 г.) диссертации. В 1980 г. ему было присвоено звание профессора. С 1982 по 1988 гг. А.П. Меренков возглавлял Лабораторию моделирования Единой системы газоснабжения во ВНИИГазе, головном институте Мингазпрома СССР, оставаясь руководителем своей научной школы в Иркутске. В 1988 г. он вернулся в Иркутск, где был избран на должность директора СЭИ СО АН СССР, сменив на этом посту академика Ю.Н. Руденко. В 1990 г. он был избран членом-корреспондентом АН СССР.

А.П. Меренков — один из создателей нового научного направления — теории гидравли-



ческих целей (премия им. Г.М. Кржижановского за 1990 г.), признанный лидер научной школы в области математического моделирования, расчета и оптимизации трубопроводных систем энергетики (тепло-, водо-, газо- и нефтеснабжения). Научная школа А.П. Меренкова в 1997 г. получила грант РФФИ по поддержке ведущих научных школ. Начиная с 1987 г., под его руководством регулярно работал всесоюзный (а затем — международный) научный семинар по межотраслевым проблемам анализа и оптимального синтеза трубопроводных и гидравлических систем, ставший центром общения специалистов из десятков городов и организаций различного профиля.

Разработанные под его руководством методы многоуровневого моделирования и согласования решений при оптимизации сложных газоснабжающих систем позволили обосновать концепцию форсированного развития газовой отрасли на востоке России и участвовать в разработке крупных инвестиционных проектов. Результаты исследований широко внедрены в практику проектирования, эксплуатации и диспетчерского управления.

В последние годы его научная деятельность была тесно связана с разработкой новой энергетической политики и энергетической стратегии России и Сибири, развертыванием масштабных работ международного уровня по проблемам развития энергетики страны в восточном геополитическом направлении. Продолжая дело Ю.Н. Руденко, А.И. Меренков возродил и возглавил семинар по проблемам надежности в энергетике, имеющий высокий авторитет как в стране, так и за ее пределами. Много и полезно работал Анатолий Петрович для Иркутска и области, помогая администрации и руководителям предприятий в принятии решений по управлению и развитию энергетики.

А.П. Меренков возглавил Сибирский энергетический институт в переломное для страны и Академии наук время, однако во многом его усилиями в институте сохранилась атмосфера демократизма, коллективного самоуправления.

Он вел большую научно-организационную, общественную и педагогическую работу. В течение многих лет был доцентом и профессором кафедры методов оптимизации Иркутского государственного университета, затем заведующим кафедрой трубопроводных систем Учебно-научно-производственного комплекса, созданного СЭИ и Иркутским политехническим институтом. Под его руководством защищены более 20 кандидатских и докторских диссертаций. За большие заслуги перед отечественной наукой А.П. Меренков был награжден орденом «Знак Почета» и медалями.

Анатолия Петровича отличали безграничная тяга к знаниям, широта взглядов и интересов, уважение чужого мнения, беспримесная доброта.

Светлая память об Анатолии Петровиче, Ученом и Человеке, останется в сердцах его коллег, друзей, учеников.

Адреса редакции: 103012 Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10



924-24-80, 928-88-69; факс 315-0698

101000 Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648

Художественный редактор Т.А. Дворецкова

Сдано в набор 26.11.97. Подписано в печать 26.12.97. Формат 60×80¹/₈.
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,8. Заказ 27

ЗАО «Знаю», 103012 Москва, Б. Черкасский пер., 2/10

Отпечатано в типографии МЭИ

111250 Москва, ул. Красноказарменная, д. 13

*Если Вы работаете в области энергетики или электротехники,
позаботьтесь о том,
чтобы Ваши предприятие, лаборатория, кафедра
не опоздали с подпиской на*

«ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

- старейший отечественный теоретический и научно-практический журнал, орган Российской Академии наук, Федерации энергетических и электротехнических обществ;
- выходит ежемесячно, предназначен для высококвалифицированных специалистов в области энергетики и электротехники;
- публикует теоретические и научно-практические работы отечественных и зарубежных ученых и инженеров, освещает работу российских и международных конференций, рецензирует учебники и монографии по тематике журнала, помещает материалы по истории электротехники, статьи о выдающихся отечественных ученых;
- журнал поступает во все промышленно развитые страны мира.

*Условия подписки в России и странах СНГ указаны в Объединенном каталоге Госкомитета РФ по связи и информатизации.
индекс 71106*

*Зарубежные читатели могут подписаться на наш журнал
по адресам фирм, указанным в журналах «Электричество»
№ 1–10, 1997.*

*В Москве подписку от зарубежных читателей принимает
АО «Международная книга», фирма «Периодика»
(117049, Б. Якиманка, 39, тел. 238-4967, факс 238-4634)*