

ISSN 0013-5380

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

*С Новым годом!*

**1994**

**1**

**1994, 1-3**

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### Секция теоретических основ электротехники, преобразовательной техники, электротехнических материалов

Лабунцов В.А., главный редактор, председатель секции (Московский энергетический институт), Бутырин П.А. (Институт высоких температур Российской Академии наук, Москва), Иоссель Ю.Я. (Научно-исследовательский институт постоянного тока, Санкт-Петербург), Комельков В.С. (Научно-исследовательский энергетический институт, Москва), Нетушил А.В. (Московская государственная академия тонкой химической технологии), Розанов Ю.К. (Московский энергетический институт), Пищиков В.И. (Московский энергетический институт), Тареев Б.М. (Всероссийский институт научной и технической информации, Москва), Толстов Ю.Г. (Научно-исследовательский энергетический институт, Москва), Чечурин В.Л. (Санкт-Петербургский государственный технический университет)

Научный редактор — Макашкин Б.Д.

### Секция электроэнергетики

Мамиконянц Л.Г., председатель секции (Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва), Будзко И.А. (Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства), Гельфанд Я.С. (Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва), Ершевич В.В. (Проектный и научно-исследовательский институт «Энергосетьпроект», Москва), Митюшкин К.Г. (Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва), Морозкин В.П. (Московский энергетический институт), Семенов В.А. (Центральное диспетчерское управление Единой энергетической системы России), Совалов С.А. (Центральное диспетчерское управление Единой энергетической системы России), Строев В.А. (Московский энергетический институт).

Научный редактор — Кудинова Л.С.

### Секция техники высоких напряжений, электрических аппаратов, трансформаторов

Ларионов В.П., председатель секции (Московский энергетический институт), Белкин Г.С. (Всероссийский электротехнический институт, Москва), Бортник И.М. (Министерство науки, высшей школы и технической политики России), Костенко М.В. (Санкт-Петербургский государственный технический университет), Лизунов С.Д. (Московский электротехнический институт), Шилин Н.В. (Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва).

Научный редактор — Кудинова Л.С.

### Секция электрических машин

Иванов-Смоленский А.В., председатель секции (Московский энергетический институт), Данилевич Я.Б. (Всероссийский научно-исследовательский институт электромашиностроения, Санкт-Петербург), Евсеев Б.Н., заместитель главного редактора журнала, Шакарян Ю.Г. (Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва).

Научный редактор — Евсеев Б.Н.

### Секция электропривода и автоматизации технологических процессов

Слежановский О.В., председатель секции (Всероссийский научно-исследовательский институт «Электропривод», Москва), Андерс В.И. (Московский энергетический институт), Борцов Ю.А. (Санкт-Петербургский электротехнический институт), Ильинский Н.Ф. (Московский энергетический институт), Шаталов А.С. (Научно-техническое объединение «Антей», Москва).

Научный редактор — Евсеев Б.Н.



# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК. Отделение физико-технических проблем энергетики;  
ФЕДЕРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ

МОСКВА

## Синтез автономных электроэнергетических систем

БУТ Д.А.

Развиваются методы анализа и синтеза автономных электроэнергетических систем на основе теории множеств и графов. Для систематизации, сопоставления и оптимизации различных структур предлагаются геометрически упорядоченные графы, построенные на основе таблиц энергетических связей (ТЭС-графы). Обсуждаются особенности системного анализа и физического моделирования систем. Рассматриваются прикладные вопросы реализации автономных электроэнергетических систем, связанные с их проектированием: сопоставление альтернативных источников и преобразователей электроэнергии, выбор параметров электроэнергии, особенности условий работы, пути совершенствования систем управления.

Methods of a synthesis and an analysis of independent electrical power systems are developed on the basis of the sets and graphs theory. Geometrically ordered graphs are put forward for systematization, comparence and optimization of various system structures. Features of a system analysis and physical modelling of the systems are discussed. Applied aspects of independent power systems realization are considered.

Автономные электроэнергетические системы (АЭЭС) широко применяются на транспорте, в авиационно-космической и судовой технике, энергоемких технологиях, электрофизических комплексах. Они обеспечивают электроснабжение в труднодоступных местностях, при возникновении экстремальных и аварийных ситуаций, питании потребителей с форсированными кратковременными режимами работы.

На рис. 1,а приведена структурная схема типового блока АЭЭС в общем виде, включающая в себя первичный источник энергии (ПИЭ), источник электроэнергии (ИЭЭ), соответствующие резервные источники (РПИЭ и РИЭЭ), преобразователи электроэнергии (П), распределительные устройства (РУ), накопители энергии (НЭ), блоки регулирования, защиты и управ-

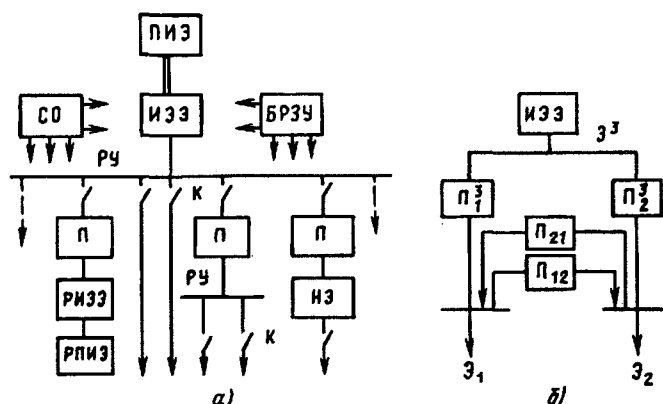


Рис. 1

ления (БРЗУ), систему охлаждения (СО), коммутационную аппаратуру (К). Возможно также введение в схему линий передачи (токопроводов)

как отдельных элементов, хотя обычно их роль в автономных установках не является существенной (можно, например, учитывать создаваемые ими эффекты в характеристиках РУ или К). Все элементы АЭЭС должны иметь согласованные характеристики и обеспечивать оптимальные или близкие к ним режимы АЭЭС по заданным целевым функциям.

Многообразие типов АЭЭС в целом и альтернативных вариантов при решении конкретной задачи значительно шире, чем для традиционных стационарных систем электроснабжения, обычно реализуемых стандартными методами. Поэтому композиционное проектирование АЭЭС должно опираться на САПР с широким использованием вычислительной техники и оптимизационных алгоритмов. Проектирование АЭЭС имеет ряд особенностей.

Во-первых, из-за физически очевидной дискретности структурных схем АЭЭС и большого числа рассматриваемых вариантов с варьируемыми элементами структурная оптимизация АЭЭС предполагает разработку компактных формализмов для фиксации всех допустимых решений и процедур их сопоставления по различным критериям. Поэтому структурную оптимизацию АЭЭС целесообразно проводить на основе методов комбинаторики.

Во-вторых, системный характер задач определяет взаимное влияние элементов АЭЭС (интегративный эффект) и несовпадение локальных (поэлементных) и общесистемных оптимальных решений. Для нахождения последних помимо структурной должна осуществляться параметрическая оптимизация, которая допускает как дискретные решения с учетом стандартизованных показателей (например частоты, напряжения), так и монотонные решения (например для токов, рабочих температур и т.п.)

В-третьих, при разработке АЭЭС необходим поиск наиболее рациональных компоновок оборудования, т.е. их пространственная оптимизация с учетом электромагнитной совместимости элементов, внешних условий, тепловых режимов и пр.

В-четвертых, особенностью проектирования АЭЭС является высокая цена ошибок при выборе нерациональных технических решений, поскольку стоимостные потери распространяются на большое число взаимосвязанных дорогостоящих агрегатов, работающих с пониженной эффективностью. Поэтому разработка АЭЭС должна сочетаться с параллельным поэтапным физическим моделированием основных элементов и подсистем, обеспечивающим достоверную проверку правильности принимаемых решений.

Таким образом, в самом общем случае АЭЭС должна разрабатываться методами композиционного проектирования сложных агрегативных систем, основанными на оптимальном пространственно-структурно-параметрическом построении автоматизированных комплексов, интегрирующих в единое целое вещественно-энергетические и информационно-управляющие компоненты [1]. Достижение подобного уровня интеллектуализации и глобальной оптимизации АЭЭС для всех режимов работы в сочетании с физическим моделированием процессов пока остается делом будущего и требует подготовительных этапов в совершенствовании применяемых методов синтеза и анализа систем с учетом имеющихся реальных прототипов оборудования и возможностей современных САПР.

Статья посвящена развитию методов структурно-параметрического синтеза АЭЭС и прикладным аспектам реализации АЭЭС, непосредственно связанным с их проектированием.

**Критерии эффективности и особенности оптимизации АЭЭС.** Типичными для АЭЭС являются критерии массы, КПД, показатели надежности, качества электроэнергии, экономические критерии, комбинированные критерии. Восстановим кратко их смысл для последующего использования при синтезе структур АЭЭС.

Критерии массы охватывает несколько понятий — установленную массу (объекта, агрегата, системы и т.п.), конструктивную массу (установленную массу с добавлением массы оборудования, необходимого для работы первичного объекта, например массы БРЗУ, РУ и т.п.), удельную массу на единицу установленной мощности  $m$  (кг/кВ·А или кг/кВт) или энергии (кг/кДж), массу функционирования (массу топлива, хладагента, смазки, требуемую для непосредственного действия объекта), массу топлива силовой установки, необходимого для транспортировки конструктивной массы и массы функционирования объекта, стартовую (полетную) массу (суммарную массу объекта и всех компонентов, обеспечивающих его работу в течение заданного времени) [2–4]. Во многих случаях критерии массы для АЭЭС считаются приоритетными и целью разработок является минимизация  $m$ , хотя часто такой подход в большей мере связан с традицией, чем с реальной оптимизацией АЭЭС, требующей учета помимо  $m$  и других критериев.

Коэффициент полезного действия  $\eta$  установки определяет эффективность преобразования энергии и потери, по которым рассчитывается система охлаждения АЭЭС. При оптимизации

АЭЭС критерии  $m$  и  $\eta$  являются противоречивыми, так как увеличение  $\eta$ , как правило, сопровождается ростом  $m$ . (Простейший пример — проводник с током, потери в котором тем меньше, чем больше его сечение и масса).

Главные критерии надежности АЭЭС — интенсивность отказов  $\lambda$  (статистическая характеристика) и вероятность безотказной работы за

время  $t$ :  $P(t) = \exp(-\int_0^t \lambda dt)$ . При  $\lambda = \text{const}$ ,  $\lambda t \ll 1$

имеем  $P \approx 1 - \lambda t$ . Соответственно, вероятность отказа  $Q = 1 - P \approx \lambda t$ .

Требования к качеству электроэнергии определяются потребителями и непосредственно влияют на конструктивные и схемные особенности, а также массу и стоимость источников и преобразователей электроэнергии. Ограничения на качество электроэнергии в АЭЭС непрерывно ужесточаются. Оно характеризуется стабильностью показателей, длительностью и характером переходных процессов, перерывами в питании.

Стабильность показателя оценивается его отклонением от номинального значения за определенное время, среднеквадратичными флуктуациями, относительной ролью высших гармоник (для переменного тока). При этом следует различать флуктуации показателя в установившихся режимах и его динамические отклонения в переходных процессах (например при резком изменении нагрузки). Нормализация последних требует существенного усложнения и удорожания БРЗУ.

Переходные процессы должны заканчиваться за определенный интервал времени, различный для номинальных и аварийных режимов. Допустимая длительность перерывов в питании также строго нормируется (например, для многих авиационных систем не более 0,01 с). Улучшение качества электроэнергии, как правило, способствует повышению надежности работы оборудования. Так, для осветительных приборов  $\lambda = \lambda_0 [0,4 + 0,6(U/U_n)^{10+12}]$ , где  $\lambda_0$  — нормальная интенсивность отказов при номинальном напряжении  $U_n$ , а  $\lambda$  и  $U$  — соответствующие ненормальные значения [4]. При  $U/U_n = 1,1$  имеем  $\lambda \approx 2,2\lambda_0$ . Кроме того, при повышенном качестве электроэнергии удастся снизить массу вторичного электрооборудования. Действительно, если зависимость  $m$  от частоты  $f$  или напряжения  $U$  носит падающий характер, то для надежной работы оборудования необходимо проектировать его на наименьшие значения  $f_{\min} = f_n - \Delta f$  и  $U_{\min} = U_n - \Delta U$ , которым соответствуют увеличенные значения  $m$  по сравнению с номинальными

( $\Delta f$  и  $\Delta U$  — отклонения частоты и напряжения). С другой стороны, повышение качества электроэнергии требует утяжеления регулировочной аппаратуры и источников электроэнергии, увеличения затрат на оборудование.

Главным экономическим критерием агрегата или системы являются суммарные затраты  $c$ , связанные со стоимостью и эксплуатацией оборудования, а также удельные затраты  $c$  на единицу мощности (энергии).

При многопараметрической оптимизации оборудования используются обобщенные критерии, например аддитивные вида [5, 7]:

$$\Theta = a_1 \vartheta_1 + a_2 \vartheta_2 + a_3 \vartheta_3 + \dots,$$

где  $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \dots$  — критерии, характеризующие определенные частные показатели оборудования [удельную массу, стоимость, относительную роль потерь  $(1-\eta)$ , вероятность отказа  $Q$ , показатели качества, и т.п.], а весовые коэффициенты  $a_1, a_2, a_3$  определяют значимость частных критериев. Минимизация  $\Theta$  обеспечивается за счет всех  $\vartheta_i (i=1, 2, \dots)$ , однако выбор  $a_i$ , как правило, не является строго обоснованным и опирается на субъективные факторы (в том числе и при использовании экспертных оценок). В принципе все  $\vartheta_i$  зависят друг от друга, однако выявление таких зависимостей возможно лишь в частных случаях [6, 16].

Оптимизация АЭЭС может осуществляться по различным критериям. Простейший подход — оптимизировать установку по одному критерию (массе, стоимости, надежности и т.п.), считая фиксированными остальные. Более полные результаты можно получить, используя метод компромиссов или последовательных уступок [5]. Его суть в том, что вначале фиксируются все критерии, кроме одного, который оптимизируется ( $\vartheta_1 \rightarrow \vartheta_{1\min}$ ). Затем назначается уступка — допустимое отклонение от  $\vartheta_{1\min}$  в заданных пределах и находится  $\vartheta_{2\min}$ . Далее задается допустимое отклонение от  $\vartheta_{2\min}$ , при котором находится  $\vartheta_{3\min}$  и т.д.

Наилучшие результаты обычно дает оптимизация по критерию  $\Theta$  с перебором характерных значений  $a_i$  и использованием ограниченного класса паретовских решений, в которых нельзя одновременно улучшить все  $\vartheta_i$ . Интересным представляется введение общего технико-экономического критерия АЭЭС, в котором все частные критерии выражаются с помощью стоимостных эквивалентов или соответствующих затрат [1, 6]. В этом случае оптимизация АЭЭС

может проводиться на достаточно строгой и однозначной основе. Однако колебания стоимостных критериев в условиях неустановившихся форм хозяйствования позволяют использовать такой подход лишь в весьма ограниченных рамках.

Оптимизация АЭЭС обычно осуществляется на локальном и системном уровнях. Первый связан с улучшением показателей отдельных объектов, второй — с синтезом оптимальных структур АЭЭС в целом. Эти уровни взаимосвязаны и предусматривают корректировку показателей и схемотехнических вариантов как отдельных элементов (подсистем), так и всей системы при итеративных приближениях к оптимальным решениям.

**Систематизация структур АЭЭС.** Эффективное решение задач синтеза структур сложных систем возможно только на основе полной и логически строгой систематизации всех альтернативных вариантов структур, удовлетворяющих исходным требованиям. В общем виде ее можно осуществить следующим образом. Пусть задан набор потребителей электроэнергии  $\mathcal{E}_j$  ( $j = \overline{1, q}$ ) проектируемой АЭЭС. Обозначение  $\mathcal{E}_j$  описывает множество, элементами которого являются параметры потребляемой электроэнергии — мощность  $S$ , напряжение  $U$ , частота  $f$  или другая временная характеристика тока, число фаз  $m$  или проводов и т.п., т.е.  $\mathcal{E}_j = \{S_j, U_j, f_j, m_j, \dots\}$ . Для заданных условий работы АЭЭС выбираются возможные ИЭЭ, преобразующие исходную энергию  $\mathcal{E}^{0i}$  в первичную электроэнергию

$$\mathcal{E}^i = \{S^i, U^i, f^i, m^i, \dots\}, i = \overline{q+1, q+p}$$

с помощью  $p$  преобразователей (генераторов). Порядок нумерации потребителей и источников может быть произвольным при условии, что каждому виду энергии присвоен определенный индекс или номер. При наличии  $p$  физических источников бывает необходимо учесть их параллельное включение (в блок), рассматривая его как дополнительный вариант источника. Хотя формально параметры последнего могут совпадать с параметрами базового источника в блоке, структурное различие между единичным источником и блоком существенное, так же, как и их надежность и стоимостные показатели. В дальнейшем особенности параллельного включения ИЭЭ обсуждаются дополнительно. Таким образом, в общем случае имеем  $i = \overline{q+1, q+p'}$ , где  $p'$  — эффективное число источников,  $p' \geq p$ ,  $(p' - p)$  — число блоков из параллельно включаемых ИЭЭ.

Согласование  $\mathcal{E}^i$  и  $\mathcal{E}_j$  обеспечивается преоб-

разователем  $P_j^i$ . Обозначим  $K_j^i = \mathcal{E}^i P_j^i \mathcal{E}_j$  — энергетический канал питания  $j$ -го потребителя (нижний индекс) от  $i$ -го источника (верхний индекс). Когда параметры потребляемой энергии совпадают в требуемых допусках с параметрами генерируемой энергии, т.е.  $\mathcal{E}^i = \mathcal{E}_j$  и потребитель непосредственно связан с ИЭЭ, то принимается  $P_j^i = 1$  и в обозначении канала преобразователь опускается, т.е.  $K_j^i = \mathcal{E}^i \mathcal{E}_j$  (такие прямые каналы удобно обозначать строчной буквой). Также допустимо принять  $P_j^i = 1$  в случае, когда энергия  $\mathcal{E}_j$  может быть заменена энергией  $\mathcal{E}^i$  (если, например,  $\mathcal{E}_j$  допускает  $f = \text{var}$ , а  $\mathcal{E}^i$  имеет  $f = \text{const}$  при одинаковых остальных параметрах, то нет смысла вводить преобразователь, ухудшающий качество энергии).

Энергия  $\mathcal{E}_j$  может быть получена из промежуточных состояний или от зажимов (через РУ) других потребителей ( $l$ ). Тогда  $K_{lj}^i = \mathcal{E}^i P_l^i P_{lj} \mathcal{E}_j$ ,  $l \neq j$ , где  $P_{lj}$  соответствует вторичным преобразовательным ступеням. В общем случае возможно многоступенчатое преобразование типа  $K_{l...j}^i = \mathcal{E}^i P_l^i P_{lm} \dots P_{rj} \mathcal{E}_j$ ,  $l \neq m \neq \dots, r$ . Оно может оказаться рациональным при оптимизации АЭЭС. Заметим, что при  $\mathcal{E}^i = \mathcal{E}_j$  не обязательно  $P_l^i P_{lm} \dots P_{rj} = 1$ . Например в канале  $K_j^i = \mathcal{E}^i P_l^i P_{lj} \mathcal{E}_j$  при  $\mathcal{E}^i = \mathcal{E}_j$  для уменьшения потерь в линии передачи и ее массы часто требуется промежуточное повышение напряжения после ИЭЭ (с помощью  $P_l^i$ ) и его обратное понижение перед потребителем (с помощью  $P_{lj}$ ). Во всех случаях канал, соединяющий  $i$ -й источник с  $j$ -м потребителем, образует базовое звено структуры АЭЭС и позволяет компактно представить любую структуру с помощью теории множеств. Альтернативные варианты, обеспечивающие получение электроэнергии  $\mathcal{E}_j$ , образуют «куст» (структуру, в которой все каналы сходятся к точке  $j$ )  $\bar{K}_j = K_j^i \vee K_{lj}^i \vee K_{l...j}^i$ ,  $j$  фиксировано, остальные индексы пробегают все возможные значения. При резервировании символ «или»  $\vee$  в обозначении  $\bar{K}_j$  может заменяться на «и», т.е.  $\wedge$ , например  $K_j^i \wedge K_j^m$  или  $K_j^i \wedge K_{lj}^m$  и т.п., где  $K_j^i$  соответствует основному каналу питания  $j$ -го потребителя, а  $K_j^m$  или  $K_{lj}^m$  — резервному (параллельному) каналу.

Для заданных  $q$  потребителей элементы множества  $\mathcal{E}(q) = \{K_1, K_2, \dots, K_q\}$  описывают все возможные структуры АЭЭС. Объединяя элементы  $\mathcal{E}(q)$  так, чтобы в каждую комбинацию входил набор альтернативных каналов, создающих энергии  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_q$ , получим коды возможных вариантов структур.

Для облегчения процедуры объединения ка-

налов необходимо систематизировать их по определенной схеме. Пусть, например, рассматриваются наиболее типичные структуры АЭЭС с одно- и двухступенчатым преобразованием электроэнергии в каналах вида  $K_j^i$  и  $K_{ij}^i$ . Тогда удобно ввести энергетическую матрицу

$$K = \begin{pmatrix} K_1^{q+1} & K_2^{q+1} & K_3^{q+1} & \dots & K_q^{q+1} \\ K_1^{q+2} & K_2^{q+2} & K_3^{q+2} & \dots & K_q^{q+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_1^{q+p'} & K_2^{q+p'} & K_3^{q+p'} & \dots & K_q^{q+p'} \\ K_{11}^{q+1}=0 & K_{12}^{q+1} & K_{13}^{q+1} & \dots & K_{1q}^{q+1} \\ K_{21}^{q+1} & K_{22}^{q+1}=0 & K_{23}^{q+1} & \dots & K_{2q}^{q+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{q1}^{q+1} & K_{q2}^{q+1} & K_{q3}^{q+1} & \dots & K_{qq}^{q+1}=0 \\ K_{11}^{q+2}=0 & K_{12}^{q+2} & K_{13}^{q+2} & \dots & K_{1q}^{q+2} \\ K_{21}^{q+2} & K_{22}^{q+2}=0 & K_{23}^{q+2} & \dots & K_{2q}^{q+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{q1}^{q+2} & K_{q2}^{q+2} & K_{q3}^{q+2} & \dots & K_{qq}^{q+2}=0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{11}^{q+p'}=0 & K_{12}^{q+p'} & K_{13}^{q+p'} & \dots & K_{1q}^{q+p'} \\ K_{21}^{q+p'} & K_{22}^{q+p'}=0 & K_{23}^{q+p'} & \dots & K_{2q}^{q+p'} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{q1}^{q+p'} & K_{q2}^{q+p'} & K_{q3}^{q+p'} & \dots & K_{qq}^{q+p'}=0 \end{pmatrix} \begin{matrix} p' \\ q \\ q \\ q \end{matrix}$$

$$(\bar{K}_1) \quad (\bar{K}_2) \quad (\bar{K}_3) \quad \dots \quad (\bar{K}_q)$$

Каждый  $j$ -й столбец матрицы описывает все каналы питания  $j$ -го потребителя (правый нижний индекс) и соответствует кусту  $\bar{K}_j$ , записанному под столбцом. Каждая строка матрицы определяет набор каналов, питающих все  $q$  потребителей от фиксированного источника (верхние  $p'$  строк), либо от фиксированного источника через зажимы фиксированного потребителя ( $p'q$  следующих строк). Например, после  $p'$  верхних строк первая из  $q$  строк, охваченных фигурной скобкой справа, соответствует вторичному питанию всех (кроме первого) потребителей от первого источника (с номером  $q+1$ ) через зажимы первого потребителя (первый нижний индекс), следующая строка — питанию потребителей от того же источника через зажимы второго потребителя и т.п. Следующая скобка справа объединяет каналы с вторичным питанием потребителей от второго источника (с номером  $q+2$ ) и т.д. Число строк в матрице есть  $p' + p'q = p'(1+q)$ . Во всех столбцах приравниваются нулю каналы вида  $K_{jj}^i$ , что физически очевидно. Поэтому число ненулевых элементов в столбце равно  $p' + p'(q-1) = p'q$ .

Можно использовать матрицу  $K$  для трех и

более ступеней преобразования, вводя каналы типа  $K_{i\dots j}^i$ , однако в автономных компактных АЭЭС их роль обычно невелика. Матрица  $K$  при этом существенно усложняется.

Все физически осуществимые структуры АЭЭС определяются наборами из  $q$  элементов, взятых по одному из каждого столбца произвольным образом. Таким образом, предельное число структур при одно- и двухступенчатом преобразовании равно

$$N_\Sigma = (p'q)^q$$

и обычно достаточно велико. Как отмечалось, в  $p'$  входят как автономные ИЭЭ, так и блоки из параллельно включаемых источников, каждый из которых можно обозначить  $K^{il} K^{kl} \dots K^{ml} = \mathcal{E}^i P^{il} \mathcal{E}^l, \mathcal{E}^k P^{kl} \mathcal{E}^l, \dots, \mathcal{E}^m P^{ml} \mathcal{E}^l, i \neq k \neq \dots m$ . Число каналов в этом обозначении равно числу ИЭЭ в блоке. Для базового источника в блоке часто  $P^{il} = 1$ . Каждый блок рассматривается как дополнительный источник с энергией  $\mathcal{E}^l, l = q+p+1, q+p'$ , причем возможен перебор различных комбинаций параллельно включаемых ИЭЭ для нахождения оптимальных вариантов с помощью вспомогательных вычислительных циклов. При резервировании в структурах АЭЭС могут использоваться несколько элементов из каждого столбца и  $N_\Sigma$  еще более возрастает.

Если в выбранном сочетании каналов имеются каналы с инверсными нижними индексами вида  $K_{ij}^i$  и  $K_{ji}^i$ , то в структуре, очевидно, существуют замкнутые контуры с двухсторонним питанием соответствующих потребителей, в противном случае сеть будет разомкнутой. Следует иметь в виду, что число рассматриваемых структур можно существенно сократить с помощью ограничений, диктуемых практическими соображениями. Например, допустимо исключить сочетания типа  $K_n^i K_{nk}^i \dots (l \neq i)$ , поскольку нет смысла получать энергию  $\mathcal{E}_n$  для ее вторичного преобразования в  $\mathcal{E}_k$  от  $l$ -го источника, если она уже создается в канале  $K_n^i$  от  $i$ -го источника. Те же соображения позволяют в ряде случаев убрать сочетания  $K_{nm}^i K_{ns}^i \dots$ . При больших  $q$  могут оказаться нерациональными структуры, в которых все каналы содержат вторичные преобразователи (в матрице  $K$  не используются элементы из  $p'$  верхних строк). Действительно, в стандартных схемах нет смысла получать  $\mathcal{E}_j$  через  $P_{ij}$  в канале  $\mathcal{E}^i P_{ij}^i P_{ij} \mathcal{E}_j$ , если имеется канал  $\mathcal{E}^i P_{ij}^i P_{jk} \mathcal{E}_k$ , где  $\mathcal{E}_j$  уже создана на промежуточном этапе, т.е. вместо указанных каналов целесообразно иметь  $\mathcal{E}^i P_{ij}^i \mathcal{E}_j, \mathcal{E}^i P_{ij}^i P_{jk} \mathcal{E}_k$ . Однако

такие структуры могут реализовываться в АЭЭС с замкнутыми сетями, обладающими повышенной надежностью электроснабжения. Для уменьшения числа рассматриваемых вариантов удобно ввести более конкретные ограничения, учитывающие компоновочные особенности АЭЭС. По степени их жесткости можно выделить следующие характерные классы структур.

1. Из  $p'$  допустимых по условиям работы источников используется какой-либо один, который через преобразователь питает одного из потребителей (первичный канал), а остальные потребители питаются через преобразователи от зажимов этого потребителя (вторичные каналы). Число структур при этом равно числу альтернативных первичных каналов:

$$N_1 = p' q.$$

2. Используются  $p'$  первичных каналов, соединяющих  $p'$  фиксированных источников с  $p'$  фиксированными потребителями с учетом энергетической совместимости, а остальные  $(q-p')$  потребителей питаются через варьируемые вторичные каналы. Очевидно, что каждый первичный канал типа  $K_{nj}^i$  вносит естественный элемент  $K_{nj}^i$  в каждый  $j$ -й оставшийся столбец матрицы  $K$ , т.е.  $j$ -й столбец содержит  $p'$  элементов. Число структур равно числу комбинаций вторичных каналов по одному из каждого  $(q-p')$  столбцов:

$$N_2 = (p')^{(q-p')}.$$

3. Используются  $q$  первичных каналов, каждый из которых соединяет потребителя с любым источником, а вторичные каналы отсутствуют. Число структур равно числу размещений из  $p'$  по  $q$  с повторениями (поскольку обычно  $q > p'$ ):

$$N_3 = (p')^q.$$

Число используемых ИЭЭ в таких структурах меняется от 1 до  $p'$ .

4. Используются  $p'$  первичных каналов (всегда задействованы все ИЭЭ), каждый из которых соединяет какой-либо из  $p'$  источников с каким-либо из  $q$  потребителей, а остальные  $(q-p')$  потребителей питаются через вторичные каналы. В  $p'$  столбцах матрицы  $K$  при этом используются верхние  $p'$  элементов, а в каждый из оставшихся  $(q-p')$  столбцов вносятся  $p'$  соответствующих элементов со вторичными каналами (элемент  $K_{nj}^i$  вносит  $K_{nj}^i$ ). Распределение  $p'$  из  $q$  потребителей между  $p'$  источниками (первичные каналы) определяются числом размеще-

ний из  $q$  по  $p'$ , а число варьируемых комбинаций вторичных каналов равно  $(p')^{(q-p')}$  (см. класс 2). Имеем

$$N_4 = q! (p')^{(q-p')} / (q-p')!.$$

Этот класс структур обычно исследуется чаще других.

5. Из  $p'$  возможных ИЭЭ используются любые  $r$  источников,  $r > 1$ ,  $r < p'$ . (Например, из пяти допустимых к рассмотрению ИЭЭ нужно выбрать два — главный и резервный). Каждый из них питает одного из  $q$  потребителей, а остальные  $(q-r)$  потребителей питаются через альтернативные вторичные каналы. Число структур равно числу сочетаний из  $p'$  по  $r$ , умноженному на  $N_4$  с заменой  $p'$  на  $r$ :

$$N_5 = \frac{(p')!}{r! (p'-r)!} \cdot \frac{q!}{(q-r)!} r^{(q-r)}.$$

Возможны и другие классы структур АЭЭС, имеющие промежуточный характер.

После выделения всех альтернативных вариантов структур АЭЭС с учетом упрощений и ограничений из них методов перебора находятся оптимальные по заданным целевым функциям (например по обобщенному критерию  $\Theta$ ).

Рассмотрим элементарные примеры систематизации структур АЭЭС. Пусть имеются два потребителя  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ , питаемые от одного источника  $\mathcal{E}^3$  (рис. 1,б). Энергетическая матрица:

$$K = \begin{vmatrix} K_1^3 & K_2^3 \\ K_{11}^3=0 & K_{12}^3 \\ K_{21}^3 & K_{22}^3=0 \end{vmatrix}.$$

Возможные структуры:  $C_1 = K_1^3 K_2^3 = \mathcal{E}^3 P_1^3 \mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}^3 P_2^3 \mathcal{E}_2$ ;  $C_2 = K_1^3 K_{12}^3 = \mathcal{E}^3 P_1^3 \mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}^3 P_1^3 P_{12} \mathcal{E}_2$ ;  $C_3 = K_2^3 K_{21}^3 = \mathcal{E}^3 P_2^3 \mathcal{E}_2$ ,  $\mathcal{E}^3 P_2^3 P_{21} \mathcal{E}_1$ ;  $C_4 = K_{12}^3 K_{21}^3 = \mathcal{E}^3 P_1^3 P_{12} \mathcal{E}_2$ ,  $\mathcal{E}^3 P_2^3 P_{21} \mathcal{E}_1$ , причем структуры  $C_1, C_2, C_3$  соответствуют разомкнутой, а  $C_4$  — замкнутой схеме сети. Принятая система обозначений структур позволяет проследить весь путь энергии от источника до потребителя при любых вариантах его питания, рассчитать энергетический баланс и нагрузку участков сети, найти требуемую мощность источника. Число структур  $N_\Sigma = 4, N_2 = N_4 = N_5 = 2, N_3 = 1$ .

Усложним модель. Пусть, например, в АЭЭС имеются потребители постоянного тока стабильного низкого и высокого напряжения ( $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ ), импульсного тока ( $\mathcal{E}_3$ ) и переменного тока стабильной частоты ( $\mathcal{E}_4$ ). По условиям работы в качестве ИЭЭ рационально использовать синх-





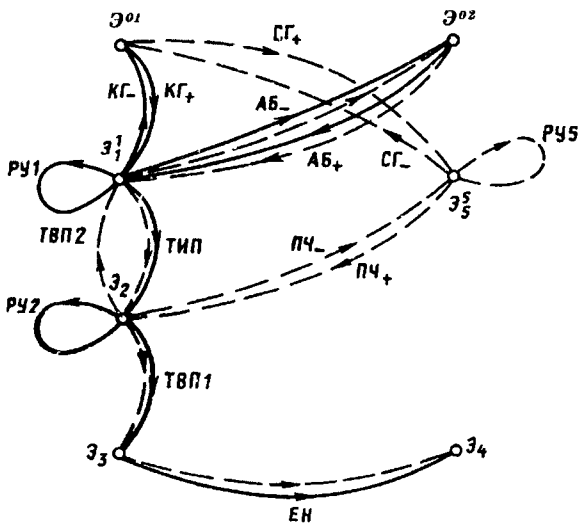


Рис. 3

На рис. 3 приведены графы первого типа для обеих АЭС (сплошные линии для первого и пунктирные для второго варианта). Табл. 1 описывает матрицу инцидентий первого графа (т.е. по существу его структуру), которая легко хранится в памяти ЭВМ. Индексы «+» в обозначениях преобразователей соответствуют основному режиму работы, а индексы «-» — обращенному режиму (стартерному у генераторов, зарядному у АБ). Аналогичные матрицы используются при анализе автономных энергосистем широкого класса [19]. В [20] при синтезе структур АЭС вводится нуль-граф первого типа, у которого фиксированными узлами являются всевозможные виды энергии, а узор дуг (элементов оборудования) варьируется для построения оптимальных решений.

Таблица 1

	КГ+	КГ-	АБ+	АБ-	ПУ1	ТИП	ПУ2	ТБП1	ЕН
Э <sup>01</sup>	+1	-1							
Э <sup>02</sup>			+1	-1					
Э <sub>1</sub>	-1	+1	-1	+1	±1	+1			
Э <sub>2</sub>						-1	±1	+1	
Э <sub>3</sub>								-1	+1
Э <sub>4</sub>									-1

Аппарат графов (в том числе пространственных) при композиционном проектировании сложных систем детально развит в [1].

Таблицы энергетических связей (ТЭС) и ТЭС-графы. В развитие матрично-графического описания АЭС можно предложить способ ко-

дирования энергетических каналов АЭС, основанный на таблицах (матрицах) энергетических связей. Строки и столбцы ТЭС соответствуют всем возможным видам энергии в АЭС рассматриваемого класса, причем нумерация строк идет снизу вверх, а идентичных столбцов — слева направо. Поток энергии направлен mnemonicически естественно слева направо по горизонтали и сверху вниз по вертикали. В ячейке «kl» на пересечении строки и столбца записывается обозначение преобразователя  $П_{kl}$  (или  $П_l^k$ ), в котором энергия строки  $Э_k$  (или  $Э^k$ ) превращается в энергию  $Э_l$  соответствующего столбца (сюда относятся и ИЭЭ, преобразующие  $Э^{0i}$  в  $Э$ ). В той же ячейке указываются количественные показатели преобразователя (или кодируются в памяти ЭВМ под номером «kl»).

Для универсализации ТЭС рационально использовать показатели, принципиально допускающие поэлементное суммирование:  $m, c, Q \approx \lambda t, \Delta p = \Delta P/S$  (относительные потери, вычисляемые через КПД, который нельзя суммировать) и др. Суммирование  $Q$  предполагает независимость отказов элементов. В последующем показатели надежности должны уточняться с учетом характера соединения элементов. Очевидно, что все показатели зависят от рассматриваемых диапазонов мощностей, частот, видов охлаждения и т.п. Поэтому целесообразно создать набор полных ТЭС (ПТЭС) со всеми заполненными ячейками, содержащими показатели  $П_{kl}$  для типовых уровней мощностей, частот и т.п. (например для 1, 10, 100, ..., кВт) и образующими исходный банк данных для синтеза и анализа структур АЭС. При этом удобно трактовать  $П_{kl}$  как вектор с проекциями на «оси» массы, стоимости, вероятности отказа, потерь и т.п., представляемыми в виде  $a_m mS, a_c cS, a_Q \lambda t, a_p \Delta pS$ , где  $a_m = 1/M_6$  ( $1/\text{кг}$ ),  $a_c = 1/c_6$  ( $1/\text{руб}$ ),  $a_Q = 1/Q_6$ ,  $a_p = 1/\Delta P_6$  ( $1/\text{Вт}$ ). Базовые значения массы  $M_6$ , стоимости  $c_6$ , вероятности отказа  $Q_6$ , потерь  $\Delta P_6$  выбираются с учетом характеристик прототипов и назначаемой весовой значимости показателя. Они могут выбираться различными для разных элементов. Эти масштабные параметры прямо связаны с весовыми коэффициентами  $a_i$ , входящими в формулу для  $\Theta$ . Например,  $a_1 = S/M_6$ ,  $a_2 = S/c_6$  и т.д. Выбирая  $M_6, c_6, Q_6, \Delta P_6$  как характерные средние показатели АЭС, можно сделать все безразмерные проекции  $П_{kl}$  соизмеримыми. Изменением какого-либо базового значения можно «отрегулировать» относительную роль показателя при разработке АЭС.

Заметим, что векторная трактовка  $П_{kl}$  носит нестрогий характер, так как его проекции не являются независимыми, однако для развивае-

мого подхода это не играет принципиальной роли. Очевидно, что вектор  $P_{kl}$  аналогичен критерию  $\Theta$  и оптимальные варианты преобразователя связаны с минимизацией модуля вектора

$$|P_{kl}| = \sqrt{(a_m^* m S)^2 + (a_c^* c S)^2 + \dots},$$

имеющей тот же смысл, что и минимизация  $\Theta$ . Однако, векторная модель удобна при анализе совокупностей  $P_{kl}$ , что важно для АЭЭС как системы. Если, например, имеется  $n$  преобразователей, то независимо от схемы их соединения им соответствует вектор  $P_n$  с проекциями

$$\sum_{i=1}^n a_{mi}^* m_i S_i; \sum_{i=1}^n a_{ci}^* c_i S_i; \sum_{i=1}^n a_{Qi} \lambda_i t; \sum_{i=1}^n a_{pi} \Delta p_i S_i; \dots$$

и длиной

$$|P_n| = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n a_{mi}^* m_i S_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n a_{ci}^* c_i S_i\right)^2 + \dots},$$

которая подлежит минимизации. Подобный подход при  $n > 1$  может быть рациональнее, чем минимизация суммы  $\sum_i \Theta_i$  для всех элементов, поскольку в  $|P_n|$  суммируются отдельные однотипные проекции, а в  $\sum_i \Theta_i = \sum_{i,k} a_k \vartheta_k$  вклад слагаемых нивелируется. С помощью векторного толкования  $P_{kl}$  и  $P_n$  процессу синтеза структур АЭЭС и их оптимизации может быть придана наглядная графическая интерпретация.

Для выбранных диапазонов мощностей, частот, температур и т.п. можно записать векторную ПТЭС (см. табл. 2), где каждый преобразователь (ячейка)  $P_{kl}$  описывается набором соответствующих проекций. Ячейкам « $kk$ » соответствует либо 1, либо  $PY$ , которое также может характеризоваться значениями  $m, c, \dots$ . Имея в памяти ЭВМ набор таких ПТЭС (для разных диапазонов параметров АЭЭС), можно легко определить «цену» реализации любого энергетического канала  $K_j^i, K_{ij}^i$  и т.п., а также любой структуры АЭЭС.

Таблица 2

$\Theta_k$					$P_{kl}$	
$\Theta_3$	$P_{31}$	$P_{32}$	$PY_3$			
$\Theta_2$	$P_{21}$	$PY_2$	$P_{23}$			
$\Theta_1$	1	$P_{12}$	$P_{13}$			
	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$\Theta_3$	— —	$\Theta_l$	— —

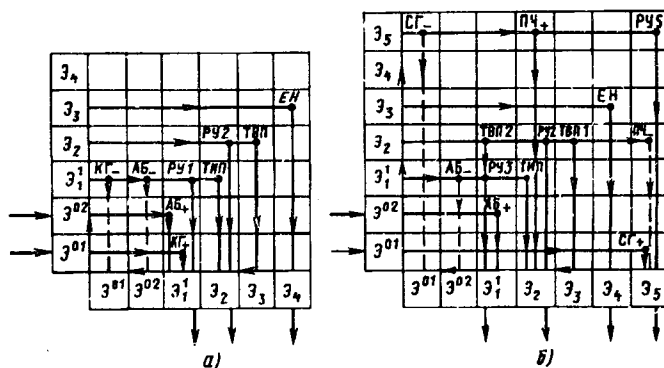


Рис. 4

Для синтеза и анализа различных структур АЭЭС целесообразно объединить ПТЭС и графы, описывающие структурные связи элементов. Это позволяет придать графовым моделям упорядоченность и логическую строгость. Удобно наложить на ПТЭС упорядоченный граф второго типа для произвольной структуры АЭЭС. Пусть, например, нужно выделить и проанализировать первый вариант АЭЭС (рис. 2,а). Упорядоченный граф на соответствующей ПТЭС (рис. 4,а) строится так. (Термин «упорядоченный» отражает тот факт, что граф на рис. 3 имеет произвольное размещение элементов, а граф на рис. 4 — строго упорядоченное.) Из  $\Theta^{01}$  в левом столбце делается «ход» вправо и вниз к  $\Theta_1^1$  через  $KГ_+$ . Затем энергия  $\Theta_1^1$  переводится из нижней индексирующей строки в левый индексирующий столбец и по соответствующей строке проводится линия до  $TИП$  и далее вниз к  $\Theta_2$ . В предшествующих ячейках строки  $\Theta_1^1$  имеются ответвления, соответствующие  $PY_1$  (затем вниз на выход), а также обращенным режимам  $KГ_-$ ,  $AB_-$ , когда восстанавливается исходная энергия (пунктирные линии). После  $TИП$  нижняя ячейка  $\Theta_2$  переводится в боковую ячейку  $\Theta_2$ , откуда горизонтальная линия идет до  $TВП$  и затем вниз к  $\Theta_3$ . Промежуточное ответвление от  $PY_2$  вниз соответствует выводу энергии  $\Theta_2$  для питания потребителей. Нижняя ячейка  $\Theta_3$  переводится в боковую  $\Theta_3$ , из которой проводится линия до  $EН$  и вниз до  $\Theta_4$  с выходом энергии. В построенном графе второго типа каждая ячейка « $kl$ » ПТЭС соответствует преобразователю и является узлом, а дуга между « $kl$ » и следующим смежным узлом (сопряженным элементом АЭЭС) имеет упорядоченную геометрию («вниз—влево—вверх—вправо») и относится к определенному виду энергии  $\Theta_l$ . Построенный таким образом спиралевидный граф можно считать изоморфным относительно графа первого типа на рис. 3, поскольку существует вза-

имно однозначное соответствие между их вершинами и ребрами с сохранением отношения инцидентности (матрица инцидентностей транспонируется). Граф второго типа, наложенный на ТЭС (или ПТЭС) назовем ТЭС-графом.

На рис. 4,б показан ТЭС-граф для структуры АЭЭС на рис. 2,б.

Считая, что все элементы ПТЭС заполнены (для простоты обозначения в части ячеек на рис. 4 опущены), можно наложить на нее большее число упорядоченных графов для каждой возможной структуры АЭЭС и затем выбрать наилучшую из них по заданному критерию (или по минимуму  $|L_n|$ ). Особенно эффективным такой подход будет при автоматизации поиска с использованием диалогового режима на ЭВМ. Для решения подобных задач могут оказаться полезными элементы классической теории графов, например известная задача о коммивояжере и др. [7].

В более общей форме суть развиваемого подхода к синтезу АЭЭС на основе ТЭС-графов поясняется рис. 5 и 6, где показаны две общие типовые структуры с параллельным (рис. 5,а)

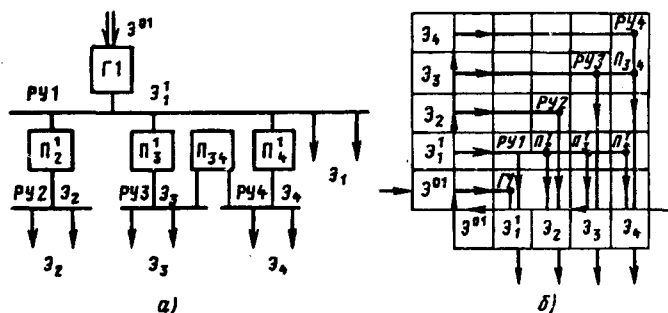


Рис. 5

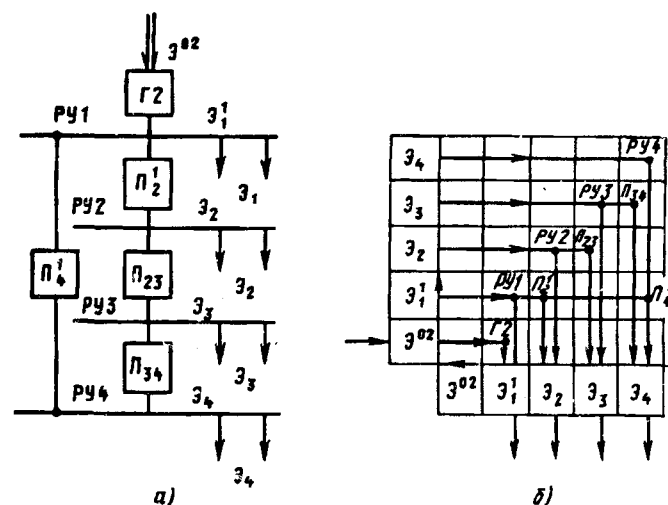


Рис. 6

и последовательным (рис. 6,а) распределением энергии. Потребители  $\mathcal{E}_4$  кроме основного канала питания (через  $P_4^1$  на рис. 5,а и  $P_{34}$  на рис. 6,а) обеспечены резервными каналами (через  $P_{34}$  на рис. 5,а и  $P_4^1$  на рис. 6,а). ТЭС-графы обеих структур АЭЭС приведены соответственно на рис. 5,б и 6,б. На той же ТЭС (или дополненной другими необходимыми видами энергии) можно исследовать смешанные параллельно-последовательные структуры, сравнивать резервные каналы и вообще синтезировать и анализировать любые структуры АЭЭС.

Стрелки на дугах ТЭС-графа могут опускаться, но он всегда является ориентированным, так как его ребра (дуги) имеют определенное направление («вниз—влево—вверх—вправо»).

Некоторые особенности системного анализа и физического моделирования АЭЭС. Аппарат ТЭС-графов позволяет наметить рациональные структуры АЭЭС при характерных относительно узких фиксированных диапазонах параметров элементов АЭЭС, описывающих свойства преобразователей  $P_{kl}$ . Нахождение оптимальных вариантов АЭЭС должно сопровождаться их параметрической оптимизацией, которая, в свою очередь, может влиять на выбор структуры АЭЭС. Поэтому необходимо сочетать оба оптимизационных процесса в рамках итеративных процедур на базе САПР. Параметрическая оптимизация требует детального учета связей между разнородными элементами АЭЭС и их взаимного влияния, которое устанавливается на основе анализа физических процессов, протекающих в каждом из элементов и описываемых соответствующими математическими моделями. Подобные задачи структурно-параметрической оптимизации весьма сложны даже при небольшом числе взаимодействующих объектов. В инженерных приближениях оценки оптимальных режимов взаимосвязанных агрегатов могут проводиться на базе простых полуэмпирических соотношений между электрическими и геометрическими параметрами.

Рассмотрим простой характерный пример. Пусть имеется АЭЭС, в которой базовыми элементами являются генератор постоянного тока  $G$  и индуктивный накопитель  $ИН$ , работающий в циклическом режиме заряд—разряд (рис. 7). Необходимо оценить оптимальную плотность тока  $J$  в  $ИН$ , при которой суммарная масса генератора ( $M_G$ ) и накопителя ( $M_{ИН}$ ) минимальна. Наличие экстремума  $M = M_G + M_{ИН}$  по  $J$  определяется тем, что при малых  $J$  накопитель требует пониженной мощности источника питания, но получается громоздким, а при больших  $J$  накопитель становится компактным, но потери в

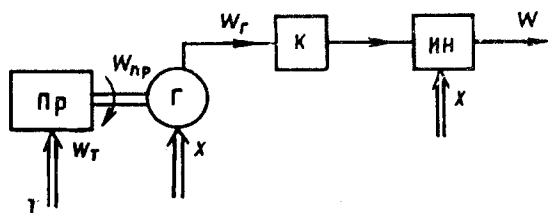


Рис. 7

нем возрастают и увеличивается масса генератора. Очевидно, что мощность генератора  $S_{\Gamma} = \rho J^2 V$ , где  $\rho$  — удельное сопротивление обмотки ИН;  $J$  — действующее значение плотности тока в ИН;  $V$  — активный объем его обмотки. Известно [12], что энергия ИН  $W$  для большинства его конструктивных исполнений пропорциональна  $J^2 V^{5/3}$ , откуда  $V \sim W^{3/5} / J^{6/5}$ . Поэтому

$$S_{\Gamma} \sim \rho J^2 W^{3/5} / J^{6/5} \sim \rho J^{4/5} W^{3/5}.$$

Зависимость  $M_{\Gamma}$  от  $S_{\Gamma}$  может быть в первом приближении принята степенной:

$$M_{\Gamma} \sim S_{\Gamma}^{n_1}, \quad n_1 = \text{const}, \quad n_1 \leq 1,$$

и соответственно

$$M_{\Gamma} = a_{\Gamma} \rho^{n_1} J^{4n_1/5} W^{3n_1/5},$$

где  $a_{\Gamma} = \text{const}$ .

С другой стороны,

$$M_{\text{ИН}} = \gamma V = a_{\text{ИН}} \gamma J^{-6/5} W^{3/5},$$

где  $a_{\text{ИН}} = \text{const}$ ,  $\gamma$  — плотность материала.

Тогда

$$M = a_{\Gamma} \rho^{n_1} J^{4n_1/5} W^{3n_1/5} + a_{\text{ИН}} \gamma J^{-6/5} W^{3/5},$$

и из условия  $\partial M / \partial J = 0$  имеем

$$J_{\text{опт}} = \left[ \frac{3a_{\text{ИН}} \gamma W^{3(1-n_1)/5}}{2a_{\Gamma} \rho^{n_1} n_1} \right]^{5/(4n_1+6)}.$$

Если в первом приближении принять  $n_1 = 1$ , то для системы с цилиндрическим ИН последнюю формулу можно привести к простому виду [12]:

$$J_{\text{опт}} = \sqrt{1,5 \gamma k_{\text{ц}} / (\rho m_{\Gamma, \text{п}}^*)},$$

где  $k_{\text{ц}}$  — отношение времени одного зарядно-разрядного цикла (с учетом пауз) к постоянной времени зарядной цепи;  $m_{\Gamma, \text{п}}$  — удельная масса

генератора с приводом. (Если, например, принять  $k_{\text{ц}} = 2$ ,  $m_{\Gamma, \text{п}} = 4 \cdot 10^{-3}$  кг/Вт, провод ИН — медный, то  $J_{\text{опт}} = 60 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>.) Аналогичный, но отличный по значению оптимум  $J$  соответствует минимальной стоимости блока «генератор—ИН». Действительно, если принять, что стоимость генератора  $c_{\Gamma} \sim S_{\Gamma}^{n_2}$ , а стоимость ИН  $c_{\text{ИН}} \sim V^{n_3}$  ( $n_2 = \text{const}$ ,  $n_3 = \text{const}$ ), то

$$c_{\Gamma} \sim \rho^{n_2} J^{4n_2/5} W^{3n_2/5}; \quad c_{\text{ИН}} \sim W^{3n_3/5} / J^{6n_3/5}$$

и соответственно суммарная стоимость  $c = c_{\Gamma} + c_{\text{ИН}}$  также имеет экстремум по  $J$ . В реальных АЭЭС подобная задача должна решаться для большего числа элементов при значительно более сложных связях между их показателями и ограничениях, однако физическая суть подхода остается той же.

Поиск оптимизированных вариантов АЭЭС при полномасштабных строгих подходах обычно базируется на вариационных методах и алгоритмах динамического программирования с учетом накладываемых ограничений на характеристики АЭЭС [8, 19].

Особенностью перехода к системному анализу АЭЭС от анализа отдельного агрегата является появление системных показателей, физическая природа которых может меняться в зависимости от рабочих режимов АЭЭС. Рассмотрим, например, тот же блок «генератор—ИН», дополненный газотурбинным или поршневым приводом генератора Пр, системой коммутаторов К и системой испарительного охлаждения СО с запасом хладагента Х (рис. 7). Такая АЭЭС должна обеспечить  $N$  зарядно-разрядных циклов ИН, запасующего в каждом цикле энергию  $W$ .

Введем удельную стартовую массу как  $m = M_{\Sigma} / W_{\Sigma}$  (кг/Дж), где  $M_{\Sigma}$  — стартовая масса АЭЭС;  $W_{\Sigma} = NW$  — полная энергия, переданная накопителю. Имеем

$$m = \frac{M_{\text{пр}} + M_{\Gamma} + M_{\text{ИН}} + M_{\text{К}} + N(m_{\Gamma} + m_{\text{Х}})}{NW},$$

где в числителе суммируются массы основных элементов: привода, генератора, ИН, коммутаторов и требуемого запаса топлива для привода и хладагента СО;  $m_{\Gamma}$  и  $m_{\text{Х}}$  — соответственно массы топлива и хладагента, необходимые для единичного цикла работы АЭЭС.

Если число циклов  $N$  мало, последним членом в числителе  $m$  можно пренебречь и нахождение минимума  $m$  связано с выявлением зависимостей масс элементов АЭЭС от  $W$  и ре-

шением задач, аналогичных рассмотренной ранее задаче о нахождении  $J_{\text{опт}}$ .

Если же  $N$  велико, то

$$m^* \approx (m_T + m_X)/W,$$

т.е. физическая суть этого показателя меняется.

Энергия, выделяемая при сжигании топлива для одного цикла  $W_T = W/(\eta_{\text{ин}} \eta_{\text{Г}} \eta_{\text{пр}})$ , где  $\eta_{\text{ин}}$ ,  $\eta_{\text{Г}}$ ,  $\eta_{\text{пр}}$  — осредненный КПД соответствующих элементов АЭС. Если  $q_T$  — теплота сгорания топлива, а  $W_T$  — энергия топлива на один цикл, то

$$m_T = W_T/q_T = W/(q_T \eta_{\text{ин}} \eta_{\text{Г}} \eta_{\text{пр}}).$$

Для расчета  $m_X$  учтем потери в генераторе  $\Delta W_{\text{Г}} = W_{\text{пр}} - W_{\text{Г}}$ , где  $W_{\text{пр}}$  и  $W_{\text{Г}}$  — энергии, получаемые от привода и генератора за один цикл. С учетом  $W_{\text{пр}} = W/(\eta_{\text{ин}} \eta_{\text{Г}})$ ,  $W_{\text{Г}} = W/\eta_{\text{ин}}$  имеем  $W_{\text{Г}} = W(\eta_{\text{Г}}^{-1} - 1)/\eta_{\text{ин}}$ . Потери в ИИ  $\Delta W_{\text{ин}} = W_{\text{Г}} - W = W(\eta_{\text{ин}}^{-1} - 1)$ . Привод охлаждается отработанными газами. Получаем

$$m_X = (\Delta W_{\text{Г}} + \Delta W_{\text{ин}})/q_{\text{п}} = W(\eta_{\text{ин}}^{-1} \eta_{\text{Г}}^{-1} - 1)/q_{\text{п}},$$

где  $q_{\text{п}}$  — теплота парообразования хладагента.

С учетом формул для  $m_T$  и  $m_X$  имеем (при больших  $N$ ):

$$m^* \approx \left( \frac{1}{q_T \eta_{\text{ин}} \eta_{\text{Г}} \eta_{\text{пр}}} + \frac{\eta_{\text{ин}}^{-1} \eta_{\text{Г}}^{-1} - 1}{q_{\text{п}}} \right).$$

В идеальной системе без потерь при  $\eta_{\text{пр}} = \eta_{\text{ин}} = \eta_{\text{Г}} = 1$  получим  $m^* = q_T^{-1}$ , когда вся первичная располагаемая энергия топлива переходит в  $W_{\Sigma}$ . При этом стартовая масса топлива намного больше массы других компонентов АЭС. В реальных случаях оптимизация такой АЭС связана с обеспечением максимальных  $\eta_{\text{пр}}$ ,  $\eta_{\text{ин}}$ ,  $\eta_{\text{Г}}$ .

При создании дорогостоящих АЭС представляется целесообразным проводить физическое моделирование их основных элементов, позволяющее судить о правильности используемых теоретических положений. Рассмотрим, например, установку с ИИ, в которой источником питания служит электромеханический накопитель, содержащий предварительно разгоняемый маховик и генератор постоянного тока с независимым возбуждением. Напряжение генератора  $U_{\text{Г}} \approx c_U \omega \Phi_{\text{Г}}$ , где  $c_U = \text{const}$ ,  $\Phi_{\text{Г}}$  — магнитный поток. Угловая частота вращения  $\omega$  определяется из уравнения  $M_{\Sigma} + J_{\Sigma} d\omega/dt = 0$ , где  $M_{\Sigma} \approx c_M i \Phi_{\text{Г}}$  — электромагнитный момент генератора,  $i$  — ток,  $c_M = \text{const}$ ,  $J_{\Sigma}$  — суммарный момент инерции ротора. Оче-

видно, что

$$\omega(t) = \omega_0 - \frac{c_M \Phi_{\text{Г}}}{J_{\Sigma}} \int_0^t i dt;$$

$$U_{\text{Г}} \approx c_U \Phi_{\text{Г}} \omega_0 - \frac{c_U c_M \Phi_{\text{Г}}^2}{J_{\Sigma}} \int_0^t i dt.$$

Характер изменения  $U_{\text{Г}}$  такой же, как при разряде конденсатора с емкостью  $C = J_{\Sigma}/(c_U c_M \Phi_{\text{Г}}^2)$ , заряженной до напряжения  $U_0 = c_U \omega_0 \Phi_{\text{Г}}$ , т.е.

$$U_C = U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t i dt.$$

Соответственно физическое моделирование можно провести на электрической цепи, содержащей модельные емкость  $C_{\text{м}}$  с начальным напряжением  $U_{0\text{м}}$  и катушку с индуктивностью  $L_{\text{м}}$  и активным сопротивлением  $R_{\text{м}}$ , моделирующую ИИ. Масштабы, связывающие модельные параметры с реальными эквивалентными параметрами схемы, находятся известными методами теории подобия. Если принять, что модель имеет те же значения индукции и проводимости провода, что и реальный ИИ, то задавая геометрический масштабный коэффициент модели  $m_l$  (кратность уменьшения размеров), получим для плотности тока  $m_J = m_l^{-1}$ , для тока  $m_i = m_l$ , для времени  $m_t = m_l^2$ , для индуктивности  $m_L = m_l$ , для емкости  $m_C = m_l^3$ , для активного сопротивления  $m_R = m_l^{-1}$  [12].

Пусть, например, ИИ моделируется подобной катушкой с  $m_l = 0,1$ . Тогда  $m_J = 10$ ;  $m_i = 0,1$ ;  $m_t = 0,01$ ;  $m_L = 0,1$ ;  $m_C = 0,001$ ;  $m_R = 10$ . Таким образом, по сравнению с реальными показателями плотность тока в десятикратно уменьшенной катушке и ее активное сопротивление будут в 10 раз больше, ток и индуктивность в 10 раз меньше, время протекания процессов в 100 раз меньше, моделирующая емкость в 1000 раз меньше, чем эквивалентная емкость источника  $C = J_{\Sigma}/(c_U c_M \Phi_{\text{Г}}^2)$ . В модели энергия накопителя и потери в нем будут в 1000 раз меньше, чем в реальном ИИ, что и обеспечивает простую реализацию модели.

Аналогичным образом можно осуществлять физическое моделирование любых элементов АЭС и установки в целом. Оно может служить хорошей основой для разработки оптимальных вариантов АЭС различной структуры и назначения.

При синтезе и анализе АЭС необходимо

учитывать ряд особенностей их практической реализации, связанных с условиями работы, рациональным выбором параметров электроэнергии, сопоставительным рассмотрением альтернативных источников и преобразователей электроэнергии, а также других элементов АЭЭС с учетом современного состояния автономной электроэнергетики. Затронем вкратце эти прикладные вопросы, непосредственно связанные с проектированием АЭЭС.

**Особенности условий работы АЭЭС.** Эти условия могут существенно отличаться от таковых при эксплуатации промышленного электрооборудования [3]. Рассмотрим, например, условия работы авиационно-космических АЭЭС. Во-первых, для них характерны широкие пределы изменения окружающей температуры (от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $500^{\circ}\text{C}$  и более для сверхзвуковых аппаратов), давления, плотности, влажности и состава атмосферы, что приводит к ликвидации естественной «смазки» в трущихся контактах и снижению электрической прочности воздуха, повышенному искрению и дугообразованию, возникновению разрядов в газах и т.п. Негативное действие на электрооборудование может оказывать озон, а также различные химически активные среды, используемые в АЭЭС (окислители, топливо, пары щелочных металлов и др.)

Во-вторых, оборудование АЭЭС испытывает повышенные динамические и вибрационные нагрузки, кратность которых по отношению к силе тяжести может быть более 100, причем оборудование может занимать произвольное положение в пространстве и работать при отсутствии силы тяжести.

В-третьих, из-за компактного размещения разнородного оборудования возникает специфическая проблема электромагнитной совместимости устройств АЭЭС.

В-четвертых, для АЭЭС в ряде случаев должна предусматриваться работа при повышенных дозах ионизирующего излучения, как естественно, так и искусственного (например, при излучении более  $10^5\text{P}$  нарушается работа полупроводников и смазки в подшипниках, а также трущихся контактов) [17].

**Выбор параметров электроэнергии АЭЭС.** Выбор рода тока, номинальных значений напряжения, частоты, числа фаз и проводов должен учитывать требования со стороны потребителей, особенности реализуемых для заданных условий источников энергии и структур АЭЭС, технику безопасности, оптимизацию режимов работы элементов и системы в целом.

Если допускается альтернативный выбор рода тока, то необходимо учитывать следующие факторы. Системы переменного тока имеют ком-

пактные электрические машины, преобразователи и коммутаторы. Их недостатки — увеличенные токи и сечения проводов при заданной активной мощности (из-за  $\cos\varphi < 1$ ), дополнительные падения напряжения на реактивных сопротивлениях, сложность параллельной работы генераторов, повышенные помехи.

Системы постоянного тока имеют относительно малое сечение проводов (при  $U = \text{idem}$ ) и их число, уменьшенные падения напряжения в линиях, хорошее регулирование генераторов и их простую параллельную работу, невысокий уровень помех. Однако в них усложнена коммутация цепей и преобразование энергии. При использовании коллекторных машин снижается надежность работы АЭЭС.

Выбор номинального напряжения  $U_n$  определяется рядом факторов. Низкие  $U_n$  приводят к большим токам (при фиксированной мощности) и потерям, сопровождаются трудностями регулирования и стабилизации параметров. Реализация высоких  $U_n$  сопряжена с проблемами изоляции проводников, техники безопасности, электрических разрядов и т.п. Обычно для магистральных каналов АЭЭС значения  $U_n$  находятся в пределах от нескольких десятков до сотен вольт. Для постоянного тока типичные значения  $U_n \approx 24 \div 30\text{ В}$ , для переменного тока  $U_n \approx 200/115\text{ В}$  (линейное/фазное). Значение  $U_n$  сильно влияет на массу распределительных сетей и относительно слабо — на массу электрических машин и трансформаторов. Рост  $U_n$  в сети снижает рабочие токи и массу проводов, но в машинах он приводит лишь к увеличению числа витков обмоток при сохранении объема проводников. Действительно, рабочие ЭДС и ток в машине (трансформаторе)  $E \sim w f B_m F_{\text{ст}}, I = J F_{\text{пр}}$ , где  $w$  — число витков обмотки,  $f$  — частота,  $B_m$  — индукция,  $F_{\text{ст}}$  — сечение стального магнитопровода,  $J$  — плотность тока,  $F_{\text{пр}}$  — сечение провода. Поскольку активное сечение обмотки  $F_{\text{обм}} = w F_{\text{пр}}$ , то расчетная мощность  $S = m E I \sim f J B_m F_{\text{ст}} F_{\text{обм}}$  ( $m$  — число фаз) не зависит от  $w$  и соответственно  $U_n$ , если объем изоляции сохраняется. При  $U_n > 1\text{ кВ}$  последний заметно возрастает.

В настоящее время активно исследуются системы постоянного тока повышенного напряжения ( $U_n \approx 270\text{ В}$ ), обеспечивающие улучшение показателей и характеристик АЭЭС, (например снижение массы сети на 70% [4]). На самолетах такие электросистемы могут заменить гидросистемы, работающие при давлениях  $(300 \div 500) \times 10^5\text{ Па}$  [9]. Главная сложность при реализации систем с  $U_n \geq 270\text{ В}$  — плохая работа полупроводниковых коммутаторов и возможность воз-

никновения электрических разрядов (коронных, тлеющих).

Выбор частоты тока  $f$  связан с тем, что при заданных размерах преобразователя ( $F_{ст}, F_{обм}$ ) имеем  $S \sim f$  (см. выше). Поэтому в бортовых системах обычно  $f \approx 400 \div 3000$  Гц. При больших  $f$  заметно возрастают потери в стальных сердечниках, падения напряжения на реактивных сопротивлениях, активные сопротивления из-за поверхностного эффекта в проводах. Кроме того, уровень  $f$  зависит от характерной частоты вращения электрических машин, которая в АЭС составляет  $n \approx (6 \div 24) \cdot 10^3$  об/мин.

Для АЭС, в которых значительная роль отводится полупроводниковым преобразователям, разрабатывается оборудование на частоту  $16 \div 20$  кГц [8, 9, 21]. При таких  $f$  трансформаторы с мощностями от 2 до 25 кВт имеют  $m = 0,1 \div 0,13$  кг/кВт.

Число фаз в системах переменного тока АЭС обычно равно  $m = 3$ , хотя в преобразовательных блоках могут использоваться как одно-, так и многофазные системы. Трехфазная система обладает высокой симметрией и позволяет создавать вращающееся магнитное поле, необходимое для машин, при минимальном числе проводников.

Системы постоянного тока выполняются двух- или однопроводными с использованием корпуса установки для замыкания тока. Хотя в последнем случае уменьшается расход материалов, надежность однопроводных систем относительно низкая. Трехфазные системы выполняются трех- или четырехпроводными (с учетом нулевого провода). Для обеспечения требуемой надежности АЭС число проводов может дублироваться, утраиваться и т.д.

**Источники и преобразователи электроэнергии для АЭС.** В табл. 3 приведены типичные средние показатели ИЭЭ для АЭС, позволяющие

провести их сопоставление и выявить главные особенности [3, 8, 10, 14, 21].

Электромеханические генераторы (ЭМГ) являются наиболее универсальным источником как переменного, так и постоянного тока с широкими диапазонами мощностей и напряжений и хорошими массо-габаритными показателями и КПД, а также высокой степенью отработанности технологии изготовления, хорошими регулируемыми качествами. Из-за наличия вращающихся частей ресурс и динамичность (быстрота запуска, изменение режима работы, реакция на перегрузки и т.п.) ЭМГ характеризуются средним уровнем. Надежность ЭМГ ниже, чем у других типов ИЭЭ.

В разработке бортовых ЭМГ отечественная промышленность достигла значительных успехов [11].

Электрохимические генераторы (ЭХГ) обладают высокими КПД и ресурсом, но плохо регулируются. Аккумуляторные батареи (АБ) обычно используются как вспомогательный или буферный ИЭЭ и характеризуются высокой динамичностью.

Солнечные батареи (СБ) получают энергию непосредственно из окружающей среды, имеют большой ресурс, но плохо приспособлены для высокودинамичных режимов, не работают без солнечного света.

Термоэлектрические (ТЭЛГ) и термоэмиссионные (ТЭМГ) генераторы характеризуются большим ресурсом, практически не зависят от окружающих условий, но из-за инерционности тепловых процессов имеют ухудшенные регулировочные и динамические характеристики, а также невысокие КПД.

Магнитогидродинамические (МГД) генераторы на продуктах сгорания являются автономными источниками большой мощности с быстрым запуском, но рассчитаны на кратковременное ис-

Таблица 3

Тип ИЭЭ	Показатель							
	Диапазон мощностей, кВт	Напряжение, В	Коэффициент полезного действия	Удельная масса, кг/кВт	Уровень			
					отработанности технологии	регулирования	ресурса	динамичности
ЭМГ	$1 \div 10^4$	$10 \div 10^4$	$\sim 0,3$ (для цикла)	$0,2 \div 1$	В	В	С	С
ЭХГ	$1 \div 100$	$10 \div 100$	$0,4 \div 0,7$	$5 \div 50$	С	Н	В	С
АБ	$0,1 \div 10$	$10 \div 100$	$0,6 \div 0,9$	$0,002 \div 0,01$ (кг/кДж)	С	Н	С	В
СБ	$0,1 \div 100$	$10 \div 300$	$0,1 \div 0,25$	$10 \div 100$	С	С	В	Н
ТЭЛГ	$0,1 \div 10$	$10 \div 50$	$0,05 \div 0,1$	$50 \div 500$	В	Н	В	Н
ТЭМГ	$1 \div 500$	$10 \div 300$	$0,1 \div 0,2$	$10 \div 100$	С	Н	В	Н
МГДГ	$> 10^3 \div 10^5$	$10^2 \div 10^4$	$0,1 \div 0,2$	$0,01 \div 0,05$	Н	С	Н	В

Примечание: В — высокий, С — средний, Н — низкий уровни.



пользование и вырабатывают энергию низкого качества.

Выбор мощности ИЭЭ при изменяющейся нагрузке АЭЭС обычно производится по графику нагрузки  $S(t)$ . За расчетную мощность принимают максимальное среднеквадратичное значение  $S_p$  за характерное время  $T$ , равное периоду выхода ИЭЭ на установившийся режим, т.е.

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt}.$$

Для АЭЭС с буферными аккумуляторами возможен выбор  $S_p$  по средней мощности за рабочий цикл. Мощность АЭЭС определяется по  $S_p$  с учетом потерь и требуемого резервирования.

Предельные значения мощности ИЭЭ и соответственно АЭЭС оцениваются с учетом ограничений, диктуемых прочностными характеристиками материалов, технологическими факторами, массо-габаритными показателями. Например, для ЭМГ характерный верхний предел  $S_{пр} \approx 10^4$  кв·А соответствует зависимости  $S_{пр} \approx 0,8 \times \times l A B_\delta u_m^3 / n^2$  (кв·А), где  $l = l/D$  — отношение длины активной зоны якоря к ее диаметру,  $A$  — линейная нагрузка (А/м),  $B_\delta$  — индукция в зазоре (Тл),  $u_m$  — максимально допустимая по условиям прочности окружная скорость ротора [10]. Если, например, принять  $l = 2$ ,  $A = 5 \cdot 10^4$  А/м,  $B_\delta = 0,7$  Тл,  $u_m = 200$  м/с,  $n = 8 \cdot 10^3$  об/мин, то  $S_{пр} \approx 0,7 \cdot 10^4$  кв·А. Для сверхпроводниковых ЭМГ это значение может быть повышено до 30 МВт за счет увеличения  $A$  и  $B_\delta$ .

Предельные  $S_{пр}$  для ЭХГ определяются условиями мобильности АЭЭС, ограничивающими их массы. Если, например, принять для ЭХГ удельную массу 10 кг/кВт, то вряд ли можно говорить о  $S_{пр} \geq 10^3$  кВт для транспортируемой АЭЭС. Солнечные батареи имеют очевидные ограничения по максимальной поверхности (из расчета, например, удельной мощности  $100 \div 200$  Вт/м<sup>2</sup> сложно реализовать транспортную установку с  $S > 100$  кВт и площадью панелей порядка  $500 \div 1000$  м<sup>2</sup>.

Термоэлектрические и термоэмиссионные генераторы для АЭЭС при достигнутых  $m$  не могут иметь  $S_{пр} \geq 100$ —500 кВт. Кроме того, из-за большого числа элементов в электрической схеме надежность таких АЭЭС невысокая. Если, например, в схеме используются  $10^5$  элементов, а интенсивность отказов для элемента  $\lambda \approx 10^{-5}$  1/час, то в АЭЭС практически постоянно будут неисправные звенья.

Магнетогидродинамические генераторы, у которых нет вращающихся частей и электросхемы просты, практически не имеют ограничений  $S_{пр}$  сверху, но эти ограничения существуют снизу, так как из-за пристеночных и краевых эффектов создание генератора на мощность меньше  $5 \div 10$  МВт нерационально.

При совместной работе нескольких ИЭЭ необходимо согласование их характеристик. В частности, только один из параллельно работающих источников может иметь астатическую вольт-амперную (внешнюю) характеристику. Для перераспределения нагрузки между ИЭЭ часть из них должна иметь регулируемые внешние характеристики, причем регуляторы могут воздействовать на рабочие процессы в ИЭЭ (например через ток возбуждения в ЭМГ) или быть автономными преобразователями энергии ИЭЭ в энергию с требуемыми характеристиками (например широтноимпульсный регулятор). Во втором случае через регулятор должна проходить вся мощность ИЭЭ.

Параллельную работу источников постоянного тока рационально осуществлять по методу мнимого статизма или ведущего источника [3, 4].

Параллельная работа ЭМГ переменного тока осуществляется по методу ведущей машины или мнимостатических характеристик привода [3, 4]. Однако для параллельной работы синхронных генераторов требуется большое число согласованных каналов регулирования как генераторов, так и привода, поэтому ее стараются по возможности избегать. Эти проблемы решаются намного проще при использовании асинхронных генераторов.

Для покрытия пиковых нагрузок АЭЭС и согласования параметров источников и потребителей используются накопители энергии [12], среди которых широкое применение находят емкостные (ЕН) и индуктивные (ИН) накопители. В ЕН обычно используются стандартные конденсаторы, а главные проблемы связаны с реализацией оптимальных режимов заряда и разряда. Характерные удельные энергии для ЕН с серийными конденсаторами составляют  $\dot{W} \approx 0,1 \div 0,2$  Дж/г. Освоен выпуск конденсаторов с  $\dot{W} \approx 1 \div 2$  Дж/г [22].

Применение ИН, помимо решения схемотехнических задач, предполагает индивидуальную разработку катушки с минимальной массой и достаточной прочностью, учет ограничений на внешние магнитные поля и т.п. Удельная энергия ИН зависит от его охлаждения и характеризуется значениями  $\dot{W} \approx 1 \div 3$  Дж/г. Для сверх-

и криопроводниковых *ИН* этот показатель может быть повышен до 10 Дж/г и более.

В АЭЭС могут применяться также механические и электромеханические накопители, позволяющие получать  $\dot{W} \approx 10 \div 100$  Дж/г. Представляют также интерес компульсаторы, объединяющие в себе электрический генератор и индуктивный накопитель с компрессией магнитного поля. Они позволяют получать серии импульсов тока нужной формы и имеют  $\dot{W} \approx 2 \div 20$  Дж/г [22, 23].

Преобразователи электроэнергии основаны на использовании электромашинных или полупроводниковых устройств. Первые имеют  $\dot{m} \approx 3 \div 15$  кг/кВт при мощностях  $10 \div 0,5$  кВт [14] и из-за вращающихся частей характеризуются пониженной надежностью и невысокими КПД ( $0,5 \div 0,6$ ), ограниченными ресурсами. Однако они сохраняют практическое значение при высоких температурах ( $200 \div 400^\circ\text{C}$ ) и повышенных уровнях радиации.

Полупроводниковые преобразователи (выпрямители, инверторы, преобразователи частоты и т.п.) становятся доминирующими в АЭЭС благодаря высокой надежности, хорошим регулировочным характеристикам, а также быстрому улучшению массо-габаритных и энергетических показателей. При традиционных системах охлаждения они имеют  $\dot{m} \approx 12 \div 2$  кг/кВт (с трансформатором) при частотах  $0,4 \div 1,0$  кГц и мощностях  $1 \div 100$  кВт [3, 8, 13, 14]. Увеличение частоты позволит приблизительно в той же мере снизить массу трансформаторов и существенно улучшить показатели преобразователей. Однако современные полупроводники не работают при температурах более  $150 \div 200^\circ\text{C}$ .

**Охлаждение АЭЭС.** Охлаждение электрооборудования определяет допустимые токовые нагрузки и непосредственно влияет на его массо-габаритные показатели.

Характерные плотности тока  $J$  для медных проводов составляют:  $2 \div 4$  А/мм<sup>2</sup> при охлаждении за счет теплоизлучения (при  $200 \div 300^\circ\text{C}$ ) [8],  $3 \div 5$  А/мм<sup>2</sup> при естественной конвекции,  $8 \div 16$  А/мм<sup>2</sup> при принудительной газовой (воздушной) конвекции,  $20 \div 25$  А/мм<sup>2</sup> при жидкостном конвективном охлаждении,  $30 \div 50$  А/мм<sup>2</sup> при испарительном охлаждении [11]. В АЭЭС используются также термоинерционные режимы оборудования [3, 10] и криогенные системы охлаждения (для крио- и сверхпроводников) с  $J \approx 100 \div 1000$  А/мм<sup>2</sup>. Охлаждение в АЭЭС может эффективно обеспечиваться первичными рабочими телами АЭЭС, например топливом маршевых двигателей бортовых энергоустановок [11], как

это было изначально предложено проф. Винокуровым В.А.

Коммутаторы, системы защиты, управления и контроля АЭЭС. Для коммутации магистральных цепей в АЭЭС используются, в основном, электромагнитные контакторы и автоматы или полупроводниковые ключи. Электромагнитные аппараты позволяют коммутировать токи до  $10^4$  А при напряжениях до  $10^4$  В и могут работать при температуре  $500 \div 600^\circ\text{C}$ , однако имеют низкое быстродействие (время коммутации  $t_k \approx 0,01 \div 0,02$  с), являются громоздкими. Их работа сильно зависит от условий окружающей среды.

Основные перспективы совершенствования коммутационной аппаратуры связаны с разработкой компактных транзисторных и тиристорных ключей, обладающих высоким быстродействием ( $t_k \approx 10^{-5} \div 10^{-3}$  с) и хорошо встраиваемых в интегральные БРЗУ в составе бесконтактных аппаратов защиты и коммутации (Б4ЗК) [4, 13]. Современные электронные ключи позволяют коммутировать токи в несколько сотен ампер при напряжениях до 1 кВ, а в процессе разработки находятся приборы нового класса, рассчитанные на  $1 \div 10$  кВ при мощностях до 100 кВт [9]. Для специализированных цепей применяются быстродействующие размыкатели (например для *ИН*) на базе тиристоров, сверхпроводниковых ключей, магнито-управляемых вентилей, насыщающихся дросселей, электро-взрывных и взрывных коммутаторов с  $t_k \approx 10^{-6} \div 10^{-3}$  с, а также быстродействующие замыкатели (например для *ЕН* на основе вакуумных разрядников) с  $t_k \approx 10^{-6} \div 10^{-3}$  с [12].

Защита АЭЭС от аварийных режимов обычно содержит несколько систем: максимальную токовую защиту, защиту от недопустимых отклонений напряжения и частоты, от небаланса фазных токов и др. [3, 4]. Система защиты может органически сопрягаться с соответствующими датчиками, регуляторами, коммутаторами, образуя единый компактный блок. Например, Б4ЗК максимальной защиты содержит силовой транзисторный ключ, объединенный с датчиками тока, усилители, формирователь ампер-секундной характеристики и узел ограничения тока (для обеспечения селективности защиты), температурное реле защиты от перегрева, блок контроля состояния ключа, фильтр защиты ключа от импульсных перенапряжений и т.п.

Управление АЭЭС до недавнего времени сводилось к локальному регулированию агрегатов и перекоммутации цепей оператором в зависи-

мости от режимов работы и требований со стороны потребителей. В настоящее время ситуация меняется и информационно-управляющая система интегрируется с АЭЭС практически на всех уровнях, обеспечивая не только простые функциональные процедуры управления, но и оптимизацию режимов АЭЭС как при нормальной, так и при аварийной работе, а также сохранение работоспособности АЭЭС для всех запланированных ненормальных режимов путем адаптивного изменения структуры цепей и постепенного отключения групп потребителей согласно заданным приоритетам нагрузок [16, 14]. Такое гибкое и глубокое управление реализуется на основе цифровых систем управления и микропроцессоров [4, 15]. Сигналы от датчиков показателей АЭЭС преобразуются в цифровую информацию и поступают к цифровым регуляторам объектов (микропроцессорам). Регулятор в соответствии с заложенной в него программой перерабатывает информацию и генерирует необходимые цифровые сигналы, которые преобразуются в аналоговые и через усилители воздействуют на объект нужным образом. Локальные цифровые регуляторы связаны между собой и с главной управляющей ЭВМ мультиплексными линиями связи в виде коаксиального кабеля, витой пары проводов или волоконно-оптического канала. По мультиплексной линии передаются закодированные пакеты данных в режиме разделения времени, содержащие адреса соответствующих терминальных устройств и режим обмена информацией. Таким образом, все объекты АЭЭС по цепям управления объединяются в единый комплекс, способный обеспечивать оптимальные режимы работы отдельных агрегатов или АЭЭС в целом по заданному алгоритму с возможным участием оператора (в диалоговом режиме). Цифровые системы управления АЭЭС могут обеспечивать защиту АЭЭС при аварийных режимах. Они также весьма эффективны и как системы контроля за состоянием оборудования, поскольку легко позволяют проверять реакцию датчиков и регуляторов на отработанные иницирующие сигналы.

Таким образом, использование полупроводниковых приборов, цифровых систем управления и мультиплексных линий является основой реализации БРЗУ новых поколений для различных типов АЭЭС.

**Выводы.** 1. Разработка АЭЭС связана с рассмотрением большого числа альтернативных вариантов, каждый из которых объединяет комбинацию базовых звеньев — энергетических каналов, связывающих фиксированный источник электроэнергии с заданным потребителем через один или несколько преобразователей.

2. Структурная оптимизация АЭЭС достигается методами комбинаторики, теории множеств и графов. Эффективные подходы к синтезу структур АЭЭС обеспечиваются с помощью энергетических матриц, систематизирующих все альтернативные варианты структур АЭЭС, и ТЭС-графов, объединяющих табличные коды энергетических переходов с упорядоченными графами, накладываемыми на универсальную область поиска оптимальных структур. При описании АЭЭС и их элементов рационально использовать обобщенные критерии, имеющие векторный характер.

3. Параметрическая оптимизация АЭЭС должна учитывать интегративные эффекты и проводиться с позиций системного подхода в сочетании с физическим моделированием процессов для проверки правильности принимаемых решений.

4. Оборудование АЭЭС быстро совершенствуется за счет высокофорсированных источников электроэнергии широкого класса, накопителей энергии, полупроводниковых преобразователей и коммутаторов, регуляторов и цифровых систем управления с мультиплексными линиями связи. Перспективы радикального совершенствования АЭЭС связаны с интеграцией силового и информационно-управляющего оборудования в единый автоматизированный комплекс.

5. Разработка АЭЭС требует учета специфических факторов: усложненных условий работы, ограничений на параметры энергии и их стандартизацию, повышенных требований к надежности и качеству электроснабжения, предельных мощностей различных источников электроэнергии и особенностей их совместной работы, интенсификации охлаждения оборудования т.п.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазарев И.А. Композиционное проектирование сложных агрегативных систем. — М.: Радио и связь, 1986.
2. Лазарев И.А. Синтез структуры систем электроснабжения летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1976.
3. Электроснабжение летательных аппаратов/В.А.Балагуров, И.М.Бесседин, Ф.Ф.Галтеев и др. Под ред. Н.Т.Коробана. — М.: Машиностроение, 1975.
4. Сиддеев И.М., Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов. — М.: Транспорт, 1990.
5. Вентцель Е.С. Исследование операций. — М.: Наука, 1980.
6. Кривенцев В.И. Критерии оценки эффективности оборудования электроэнергетических систем транспортных средств. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1978, № 1.
7. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Глибицкий М.М. Системы питания и управления электрическими ракетными двигателями. — М.: Машиностроение, 1981.
9. Брускин Д.Э., Зубакин С.И. Самолеты с полностью электрифицированным оборудованием. — Итоги науки и техники. Сер. Электрооборудование транспорта. Т.6. — М.: ВИНТИ, 1986.

10. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. — М.: Высшая школа, 1990.
11. Веников Г.В., Ключков О.Г. Тенденции и перспективы развития бортовых электрических генераторов. — Авиационная промышленность, 1991, № 2.
12. Накопители энергии/ Д.А.Бут, Б.Л.Алиевский, С.Р.Мизюрин и др. Под ред. Д.А.Бута. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
13. Микроэлектронные электросистемы/ Ю.И.Конев, Г.Н.Гулякович, К.П.Полянин и др. Под ред. Ю.И.Конев. — М.: Радио и связь, 1987.
14. Бут Д.А., Мизюрин С.Р. Системы генерирования электроэнергии летательных аппаратов. — М.: Изд. Московского авиационного института, 1982.
15. Информационно-управляющие системы космических энергетических установок/ В.В.Бугровский, В.К.Жаров, Ю.В.Ковачич и др. Под ред. Б.Н.Петрова — М.: Атомиздат, 1979.
16. Морозовский В.Т., Синдеев И.М., Рунов К.Д. Системы электроснабжения летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1973.
17. Орлов Е.Г., Тыричев П.А., Хаустов В.Н. Особенности применения и обеспечения работоспособности электромеханических систем в условиях ионизирующего излучения. — М.: Изд. Московского энергетического института, 1985.
18. Системы автоматизированного проектирования. Кн. 4. Математические модели технических объектов: Учеб. пособие для втузов/ В.А.Трудоношин, Н.В.Пивоварова. Под ред. И.П.Норенкова. — М.: Высшая школа, 1986.
19. Тимашев С.В., Кузьмин М.А., Чилин Ю.Н. Оптимизация энергетических систем орбитальных пилотируемых станций. — М.: Машиностроение, 1986.
20. Лазарев И.А., Розанов А.В., Янышев Ю.А. О синтезе единой электроэнергетической системы транспортных средств. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1983, № 1.
21. Proc. of the 25-th Intersociety Energy Conversion Eng. Conf., Reno, Nev., August 12—17, 1990: IECEC-90, vol. 1/Ed. Nelson Paul. — New York.
22. Gully J.H. Power Supply Technology for Electric Guns. IEEE Trans. on Magnetics, vol. 27, № 1, Jan. 1991.
23. Бут Д.А., Конев С.М.-А. Электродинамические генераторы. — Электричество, 1991, № 11.

[10.12.92]

*Автор: Бут Дмитрий Александрович окончил факультет электрификации промышленности и транспорта Московского энергетического института в 1956 г. В 1971 защитил докторскую диссертацию в Московском авиационном институте (МАИ). Зав. кафедрой «Электроэнергетические и электромеханические системы» МАИ.*

## Регулирование частоты и перетоков мощности при параллельной работе энергообъединений России, Восточной и Западной Европы

БОНДАРЕНКО А.Ф., КОМАРОВ А.Н., МАШАНСКИЙ А.М., ПОРТНОЙ М.Г

*Рассмотрена эффективность различных вариантов регулирования частоты и перетоков активной мощности при предстоящем объединении на параллельную работу энергообъединений России, Восточной и Западной Европы (UCPTE). Для исследования разработана цифровая нелинейная динамическая модель энергообъединения как объекта регулирования системы автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности. Расчеты на модели переходных процессов изменения частоты и перетоков активной мощности в этом сверхмощном энергообъединении при различного вида возмущениях показали, что параллельная работа по намеченным к вводу линиям электропередачи Восток—Запад вполне возможна при наличии во всех энергообъединениях эффективно действующих систем регулирования частоты и обменной мощности.*

*This article deals with the efficiency of different variants of the frequency and tie-line power control for the forthcoming connection for a parallel operation of the interconnected power systems of Russia, Eastern and Western Europe (UCPTE). For a purpose of research of the digital nonlinear dynamic model of the interconnected power system as a controlled plant for the load-frequency control system is elaborated. The model calculations of frequency and tie-line power transients in this ultra high-power interconnection under disturbances of different kinds have shown that a parallel operation through East—West tie-lines which are now under construction is quite possible if there are effectively operated load-frequency control systems in all power systems interconnected for a parallel operation.*

**Введение.** В последнее время развернулись работы по объединению на параллельную работу Единой энергосистемы (ЕЭС)\* и энергосистем

Восточной Европы с энергообъединениями Западной Европы (UCPTE) (энергообъединение «Восток—Запад»). Взаимные выгоды от такого соединения: взаимная помощь при возникновении дефицитов мощности, использование сдвига по времени максимумов нагрузки в различных

\* Здесь и далее под ЕЭС понимается объединение энергосистем стран, входящих в бывший СССР.

энергообъединениях, стабилизация частоты, возможность уменьшения необходимого вращающегося резерва, повышение надежности энергоснабжения потребителей, особенно в примыкающих друг к другу частях энергообъединений и т.д.

Для того чтобы обеспечить возможность параллельной работы столь мощных энергообъединений, необходимо решить проблему регулирования частоты и потоков активной мощности. При этом, учитывая различие, которое исторически сложилось между подходом к системе автоматического регулирования частоты и активной мощности (АРЧМ) на востоке и на западе Европы, должны быть проработаны вопросы возможности сочетания различных систем АРЧМ, выбора критериев регулирования, необходимых величин регулировочных диапазонов, структуры, согласования быстрого действия и параметров настройки систем АРЧМ и т.д.

Одним из способов исследования этой проблемы является математическое моделирование энергообъединения как объекта управления для систем АРЧМ и оценки процессов изменения частоты и потоков мощности при различных вариантах регулирования.

В статье приведены результаты моделирования энергообъединения «Восток—Запад» как объекта регулирования для систем АРЧМ и анализ процессов изменения частоты и потоков мощности, проведенный с целью оценки совместности систем АРЧМ Западного и Восточного энергообъединений (ОЭС).

**Постановка задачи.** Одним из основных условий соединения на параллельную работу энергообъединения «Восток—Запад» является наличие в этих ОЭС эффективно действующих систем АРЧМ.

Это обусловлено в первую очередь экономическими причинами: регулирование частоты и потоков активной мощности требует затрат, которые тем больше, чем большую долю общих колебаний нагрузки принимает на себя регулирующая энергосистема. Применение АРЧМ позволяет четко установить эту долю. Кроме того, в системах переменного тока возмущение (в виде небаланса активных мощностей), возникающее в любом узле, распространяется по всему энергообъединению и вызывает изменение частоты и в большей или меньшей степени изменение потоков мощности.

Задачей системы АРЧМ является выполнение ряда функций по ведению режимов объединенных энергосистем:

- регулирование частоты (АРЧ);
- регулирование суммарной обменной мощности (сальдо) по границам каждого энергообъ-

единения.

Как правило, эти функции объединяются и осуществляются по критерию Гранера—Дарье или критерию системных характеристик [1]:

$$\xi = \Delta P_{\text{обм}} + k \Delta f \Rightarrow 0, \quad (1)$$

где  $\xi$  — системная ошибка;  $\Delta P_{\text{обм}}$  — отклонение суммарной обменной мощности энергообъединения от заданного значения (положителен экспорт мощности);  $\Delta f$  — отклонение частоты от номинального (или согласованного) значения;  $k$  — коэффициент передачи регулятора по частоте, задаваемый численно равным крутизне характеристики данного энергообъединения по частоте.

При указанном выборе коэффициента передачи регулятора по частоте системная ошибка равна как по значению, так и по знаку небалансу мощности в «своем» энергообъединении. Целью регулирования является сведение к нулю системной ошибки, т.е. небаланса мощности соответствующим изменением мощности своих электростанций. При отсутствии небаланса мощности в других энергообъединениях в результате такого регулирования и потоки, и частота возвращаются к заданным значениям.

При возникновении небаланса мощности в «чужом» энергообъединении и вследствие общего изменения частоты и действия первичного регулирования изменяется обменная мощность также и данного энергообъединения. Однако системная ошибка регулятора остается практически нулевой, поскольку входящая в критерий регулирования составляющая отклонения частоты компенсируется составляющей отклонения сальдо потоков. Эта компенсация тем полнее, чем ближе коэффициент передачи по частоте к фактической крутизне частотной характеристики энергообъединений. При этом регулятор в действие не вступает.

Таким образом, описанный регулятор обладает селективностью, т.е. способностью выделять и устранять небалансы мощности в собственном энергообъединении.

Путем исключения одного из слагаемых в выражении (1) легко перейти либо на регулирование только частоты (режим АРЧ), либо на регулирование только потока обменной мощности (режим АРП).

Несмотря на общие функции, концепции системы АРЧМ в разных энергообъединениях приняты разные. Так, в ЕЭС система АРЧМ построена по иерархическому принципу с тремя уровнями: 1 — ЕЭС, 2 — объединенная энергосистема (ОЭС), 3 — электрические станции. причем эти уровни совпадают с уровнями диспетчерского управления.

В энергообъединении стран Западной Европы системы АРЧМ построены по децентрализованному принципу: в каждой из входящих в энергообъединение энергосистем система АРЧМ выполняет функции регулирования частоты и суммарной обменной мощности по своим границам по критерию системных характеристик.

При соединении энергообъединений стран Западной и Восточной Европы и ЕЭС на параллельную работу возникает задача организации совместного регулирования частоты и перетоков мощности системами АРЧМ, построенными на разных принципах, и координации режимов регулирования, осуществляемых этими системами.

Представляет интерес два возможных варианта сочетания режимов систем АРЧМ в разных энергообъединениях:

1 — в странах Западной Европы (УСРТЕ) действует АРЧМ по критерию системных характеристик (как и принято в настоящее время); в странах Восточной Европы АРЧМ регулируют сальдо перетоков мощности каждой из национальных энергосистем; в ЕЭС АРЧМ регулирует обменную мощность с энергообъединением стран Восточной Европы;

2 — во всех энергообъединениях АРЧМ национальных энергосистем регулируют частоту и обменные мощности по критерию системных характеристик.

**Расчетная схема.** Поскольку для данного анализа интерес представляют частота во всем энергообъединении и суммарные перетоки мощности между ЕЭС и энергосистемами Восточной Европы, а также между энергосистемами стран Восточной и Западной Европы, отдельные энергообъединения рассматриваются как единое целое и их внутренние сети и перетоки по ним не раскрываются.

Расчетная схема для этого анализа представлена на рис. 1. При анализе предполагается, что все электростанции в той или иной мере участвуют в первичном регулировании частоты, а ГЭС, кроме того, и во вторичном регулировании режима по частоте и обменной мощности.

В качестве расчетного возмущения принимается отключение мощного энергоблока (1000 МВт) поочередно в каждой из ОЭС. Задачей анализа является определение изменений частоты и перетоков мощности во времени при разных вариантах регулирования.

**Структурная схема модели.** При моделировании приняты следующие допущения:

каждая из трех ОЭС считается концентрированной, т.е. жесткость внутренних связей принимается намного большей жесткости связей между ОЭС и пренебрегается сдвигом фаз между векторами напряжений во внутренних узлах; при

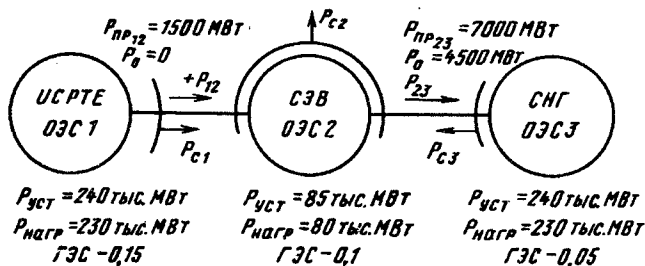


Рис. 1. Расчетная схема: ОЭС1 — энергообъединение стран Западной Европы; ОЭС2 — энергообъединение стран Восточной Европы; ОЭС3 — ЕЭС (СНГ);  $P_{уст}$  — установленные мощности в каждом из энергообъединений;  $P_{нагр}$  — значения нагрузок в этих энергообъединениях для расчетного случая;  $P_{пр}$  — пределы передаваемой мощности по связям между ОЭС1 и ОЭС2, ОЭС2 и ОЭС3;  $P_0$  — исходные перетоки по этим связям в расчетном случае; указаны также соотношения мощностей гидроэлектростанций (ГЭС) в общей установленной мощности каждого из энергообъединений и принятые положительные направления перетоков мощности

этом каждая ОЭС характеризуется единой частотой и все множество генераторов представляется одним эквивалентным генератором, который связан с несколькими группами эквивалентных турбин, отражающими различную реакцию турбин на изменение частоты;

напряжение на шинах эквивалентного генератора постоянно;

нагрузка приложена к валу эквивалентного генератора;

межсистемные связи замещаются индуктивными сопротивлениями.

Разработанная при этих допущениях структурная схема модели приведена на рис. 2 [3]. На этой схеме три эквивалентных генератора (ОЭС1, ОЭС2 и ОЭС3), отражающие динамику всех маховых масс (генераторов, турбин и нагрузок), соединены каждый с двумя группами турбин: группой регулирующих ГЭС, снабженных системами управления мощностью и подключенных к системам АРЧМ, и группой нерегулируемых турбин, отражающих реакцию всех остальных, не подключенных к системам АРЧМ турбин, на изменение частоты. В группе ГЭС учтены динамика автоматических регуляторов частоты вращения (АРЧВ) и гидроудар. В нерегулируемой группе турбин, передаточная функция которой аппроксимирована по реальной характеристике изменения частоты в энергообъединении, приближенно учтены длительные переходные процессы в системах регулирования котлов на ТЭС [2]. В схеме модели учтена реакция нагрузки на изменение частоты и введены нелинейный характер зависимости крутизны частотной характеристики от значения отклонения частоты и нелинейность типа «синус» зависимости перетока мощности от угла между векторами напряжений эквивалентных генераторов.

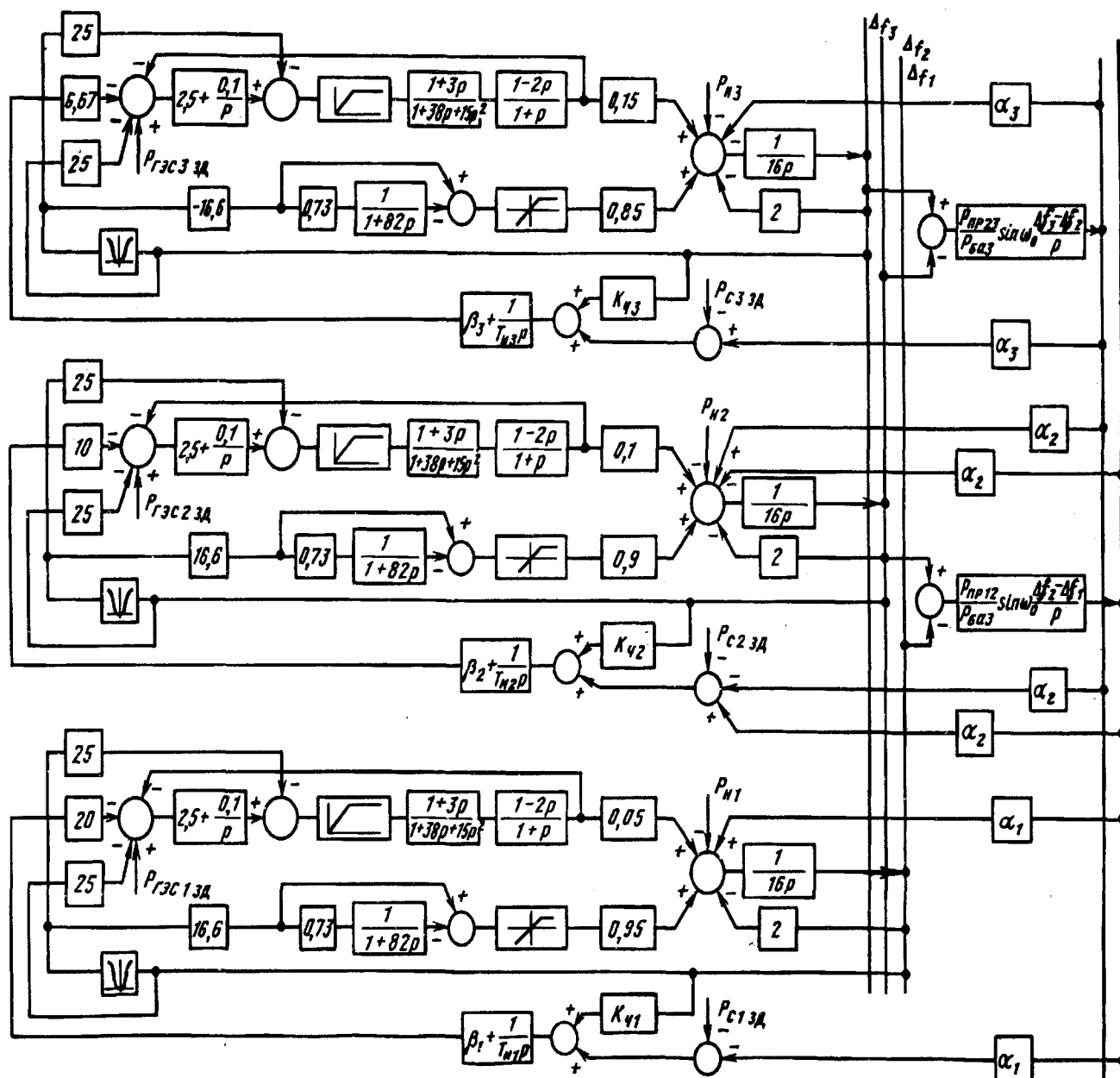


Рис. 2. Структурная схема модели

Все значения в модели приведены в относительных единицах, причем за базисные значения приняты соответственно: установленные мощности ОЭС, суммарные мощности групп турбин, значения суммарных регулировочных диапазонов регулирующих групп турбин, для перетоков мощности — 1000 МВт, для частоты — 50 Гц.

**Расчет переходных процессов в нерегулируемом энергообъединении.** Расчет проведен при отсутствии систем вторичного регулирования АРЧМ. Такой расчетный режим, но с учетом первичного регулирования частоты, позволяет определить характеристики энергообъединения как объекта управления для систем АРЧМ и

является исходным для сравнения с последующими расчетами при включенных системах АРЧМ.

Результаты расчетов переходных процессов и установившихся значений частоты  $\Delta f$  и сальдо перетоков мощности  $\Delta P_{c1}$ ,  $\Delta P_{c2}$  и  $\Delta P_{c3}$  соответственно ОЭС1, ОЭС2 и ОЭС3 при создании расчетного возмущения (–1000 МВт) в ОЭС2 приведены на рис. 3 и 4 как исходные для последующих расчетов и сравнения и обозначены индексом «0». Максимальные (установившиеся) отклонения частоты, сальдо перетоков мощности и самих перетоков мощности в переходных процессах приведены в табл. 1.



Таблица 1

Место возмущения	Параметр			
	$\Delta f$ , Гц	$\Delta P_{23}/\Delta P_{c3}$ , МВт	$\Delta P_{12}/\Delta P_{c1}$ , МВт	$\Delta P_{c2}$ , МВт
ОЭС1	-0,033	+545/+545	+810/-810	+265
ОЭС2	-0,032	+420/+420	-450/+450	-870
ОЭС3	-0,031	-730/-730	-565/+565	+165

Из анализа этих результатов следует, что в нерегулируемой ОЭС вследствие возмущения возникают и длительно (до вмешательства персонала) сохраняются отклонения частоты, перетоков мощности и их сальдо. Их значение определяется значением и местом возникновения возмущения, мощностью частей объединения и эффективностью первичного регулирования частоты в них. Эти длительные отклонения параметров режима могут представлять опасность для сохранения устойчивости параллельной работы частей объединения или нарушить согласованные графики межсистемных перетоков, что недопустимо по экономическим условиям. Для нормализации режима требуется принятие мер оперативным персоналом либо использование соответствующих систем АРЧМ.

Сравнительно небольшие отклонения частоты (0,03 Гц) при таком значительном возмущении, как отключение энергоблока мощностью 1000 МВт обусловлены весьма большой мощностью рассматриваемого энергообъединения. Различные значения отклонения частоты в трех вариантах обусловлены разными местами возникновения возмущения и наличием зон нечувствительности в АРЧВ.

**Расчет переходных процессов при регулировании частоты и перетоков мощности по первому варианту.** Первым рассмотрим вариант координации режимов систем АРЧМ в энергообъединении Восток-Запад, при котором в каждой из энергосистем УСРТЕ (ОЭС1) осуществляется АРЧМ со статизмом по частоте, поскольку этот режим в УСРТЕ обязателен на практике и каждая энергосистема стран-участниц поддерживает суммарный обменный переток мощности по своим границам со статизмом по частоте. Принцип регулирования — децентрализованный, и единого центра управления энергообъединения нет. Централизованно определяются лишь взаимные поставки электроэнергии между энергосистемами — участниками параллельной работы.

В энергообъединении стран Восточной Европы, центральное диспетчерское управление которого (ЦДУ ОЭС) находится в Праге (Чехия), каждая страна-участница регулирует свое сальдо, при этом координация перетоков мощности

между странами осуществляется диспетчером ЦДУ ОЭС. Центральной системы АРЧМ нет, поэтому в первом рассматриваемом варианте принимаем, что все страны Восточной Европы (ОЭС2) автоматически регулируют свой суммарный переток с УСРТЕ (ОЭС1) и с ЕЭС (ОЭС3).

Как указывалось ранее, в ЕЭС действует центральная координирующая система (ЦКС) АРЧМ, которая работает в режиме регулирования частоты. Регулирование суммарного перетока мощности по связям со странами Восточной Европы не осуществляется, поскольку в соответствии с действующими соглашениями регулирование частоты осуществляется ЕЭС. При соединении на параллельную работу с УСРТЕ принцип действия АРЧМ Восточного энергообъединения должен существенно измениться. Поэтому в первом варианте рассмотрим режим автоматического регулирования перетока по связям с Восточной Европой, осуществляемой в ЕЭС.

Основным критерием при всех этих режимах является селективность (автономность) систем вторичного регулирования по возмущению, т.е. необходимость компенсации возмущения в конечном итоге в установившемся режиме (в «статике») генераторами той энергосистемы, где это возмущение возникло, а также непротиводействие систем вторичного регулирования взаимопомощи энергосистем при возмущениях, обусловленной действием систем первичного регулирования.

Рассмотрим результаты расчетов переходных процессов изменения частоты, мощности агрегатов, участвующих в первичном регулировании, сальдо перетоков мощности, управляющих воздействий от систем АРЧМ по варианту 1 и мощности регулирующих электростанций в трех энергообъединениях (ОЭС1, ОЭС2 и ОЭС3) при создании расчетного возмущения (отключение энергоблока мощностью 1000 МВт) поочередно в каждой из ОЭС.

Из графиков переходных процессов (рис. 3) следует, что при возникновении возмущения происходят резкие изменения перетоков и частоты, которые в отличие от нерегулируемого энергообъединения (кривые с индексом «0») в результате действия систем АРЧМ сводятся к нулю за время, примерно 500 с. В установившемся режиме возмущение компенсируется генераторами ОЭС2 (рис. 3,ж), где это возмущение произошло, т.е. принцип автономности по возмущению обеспечивается. Однако в переходном процессе к изменениям перетоков мощности, обусловленным возмущением и первичным регулированием частоты, добавляются также и временные изменения этих перетоков



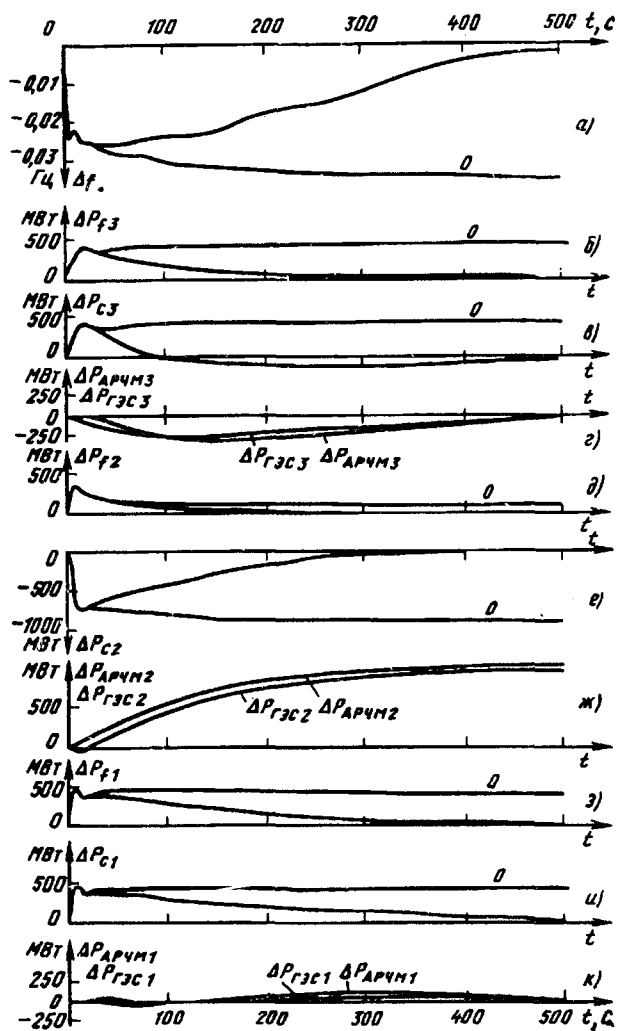


Рис. 3. Графики переходных процессов при возникновении возмущения только в ОЭС2 (первый вариант)

вследствие неселективного действия систем АРЧМ и вызванных этим изменений мощности регулирующих электростанций в других энергосистемах, где не было возмущения (рис. 3,з и к). К концу переходного процесса эти изменения мощности сводятся к нулю. В данном случае вследствие неселективного действия регулятора перетока в ОЭС3 (ЕЭС) (рис. 3,з), противодействующего взаимопомощи энергосистем, обусловленной действием первичного регулирования (рис. 3,б), наблюдается реверс сальдо перетоков  $\Delta P_{с3}$  (рис. 3,е), что приводит к затягиванию переходных процессов и излишнему изменению мощности регулирующих электростанций. Аналогичные процессы имеют место при этом варианте координации и при возмущениях в ОЭС1 и ОЭС3.

Отклонения мощностей регулирующих электростанций во всех трех энергообъединениях для этого варианта координации и при возмущениях, поочередно возникающих в этих трех энерго-

объединениях, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Место возмущения	Отклонение мощности, МВт		
	$\Delta P_{гэс1}$	$\Delta P_{гэс2}$	$\Delta P_{гэс3}$
ОЭС1	+1000/+1000	0/-162	0/-268
ОЭС2	0/+102	+1000/+1000	0/-256
ОЭС3	0/+98	0/-145	+1000/+1000

Примечание. В числителе значения в установившемся режиме, в знаменателе — максимальные значения в переходном режиме.

Таким образом, координация режимов регулирования по первому варианту обеспечивает компенсацию возмущений во всех трех энергообъединениях с соблюдением принципа автономности в установившемся режиме, но в динамике имеет место довольно существенное отклонение от этого принципа, что приводит к излишнему временному изменению мощности электростанций под действием систем АРЧМ в тех энергосистемах, где возмущения не было, затягиванию переходных процессов и реверсу сальдо перетоков.

Расчет переходных процессов при регулировании частоты и перетоков мощности по второму варианту. Рассмотрим вариант сочетания режимов АРЧМ по критерию системных характеристик, осуществляемых в энергосистемах всех трех энергообъединений одновременно. Это реальный вариант, поскольку в энергообъединении УСРТЕ этот режим системы АРЧМ постоянно осуществляется во всех энергосистемах, а в ЕЭС и в ОЭС стран Восточной Европы этот режим предусмотрен в системах АРЧМ. Однако переход на этот режим АРЧМ обуславливает необходимость пересмотра существующих соглашений.

Рассмотрим расчеты переходных процессов изменения частоты, мощности агрегатов, участвующих в первичном регулировании, сальдо перетоков мощности, управляющих воздействий от систем АРЧМ и мощностей регулирующих электростанций по этому, второму, варианту при создании расчетного возмущения поочередно в каждом из трех ОЭС (рис. 4).

При тех же параметрах настройки систем регулирования ( $T_n=100$  с) процессы сведения к нулю начальных отклонений частоты и сальдо перетоков мощности заканчиваются за время порядка 300 с, быстрее чем в первом варианте, причем процессы эти апериодические без перерегулирования и без реверса сальдо перетоков.

В установившемся режиме компенсацию возмущения осуществляют генераторы той энергосистемы (ОЭС2), где возмущение возникло, т.е.

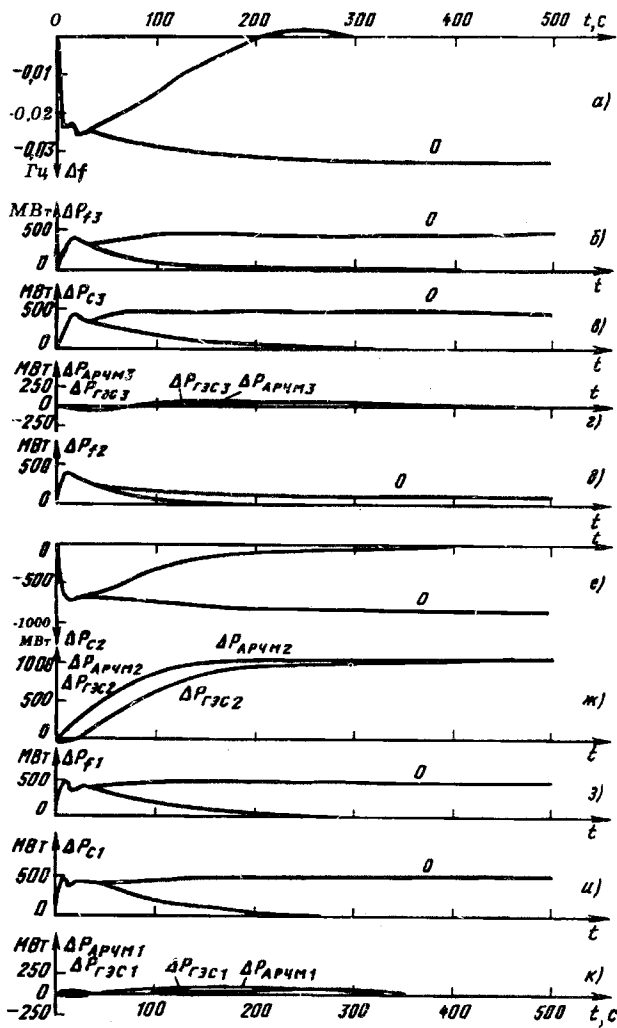


Рис. 4. Графики переходных процессов при возмущении только в ОЭС2 (второй вариант)

принцип автономности соблюдается. Однако в переходном процессе, как и в предыдущем случае, также имеет место изменение мощности генераторов под действием систем АРЧМ в тех энергосистемах, где возмущения не было, т.е. в переходном процессе принцип автономности соблюдается не полностью. Отклонения мощности регулирующих электростанций в статике и в динамике приведены в табл. 3.

Таблица 3

Место возмущения	Отклонение мощности, МВт		
	$\Delta P_{ГЭС1}$	$\Delta P_{ГЭС2}$	$\Delta P_{ГЭС3}$
ОЭС1	+1000/+1000	0/+71	0/+70
ОЭС2	0/+62	+1000/+1000	0/+69
ОЭС3	0/+60	0/+66	+1000/+1000

Примечание. В числителе значения в статике, в знаменателе — в динамике.

Из сопоставления данных табл. 2 и 3 следует,

что во втором варианте для аналогичных возмущений отклонения мощности регулирующих электростанций в динамике, обусловленные неполным соблюдением принципа автономности, меньше, чем в первом варианте, т.е. во втором варианте принцип автономности соблюдается более строго и лишнее изменение мощностей регулирующих электростанций в течение переходного периода минимизируется.

Таким образом, второй вариант координации режимов регулирования предпочтительнее первого как по характеру переходных процессов, так и по более строгому соблюдению принципа автономности по возмущению. Кроме того, при этом варианте системы АРЧМ не препятствуют взаимопомощи энергосистем, обусловленной действием первичного регулирования частоты, чем исключается реверс сальдо перетоков мощности и излишнее затягивание процессов регулирования.

Расчет переходных процессов при отказе систем АРЧМ, в том числе при исчерпании регулировочных диапазонов. Важные задачи по регулированию режима, возлагаемые на системы АРЧМ, определяют и повышенные требования к техническому и программному обеспечению этих систем, к их эффективному и непрерывному функционированию. Одним из условий эффективного функционирования систем АРЧМ является наличие на регулирующих электростанциях достаточных регулировочных диапазонов на загрузку и разгрузку. Значение необходимого регулировочного диапазона определяется, с одной стороны, возможностью аварийного отключения самого мощного энергоблока, а с другой стороны — значением нерегулярных колебаний нагрузки, включая временные несовпадения нагрузки электростанций и потребителя в часы подъема и спада суточного графика нагрузок, компенсировать которые в нормальном режиме при регулировании частоты и сальдо перетоков мощности приходится системам АРЧМ.

Если в процессе регулирования происходит исчерпание регулировочного диапазона на всех регулирующих электростанциях данного энергообъединения, то это приводит к прекращению функционирования системы АРЧМ в этом энергообъединении. В этом случае при возникновении возмущения в этом энергообъединении оно автоматически не компенсируется и вызывает длительные (до вмешательства персонала) отклонения частоты и сальдо перетоков мощности всех энергообъединений, даже в тех, где системы АРЧМ продолжают функционировать в режиме регулирования сальдо перетоков с коррекцией по частоте, поскольку эти системы АРЧМ воспринимают это возмущение как «чужое» и не ре-

агирует на него, т.е. имеет место ситуация, аналогичная нерегулируемому энергообъединению.

Таким образом, при функционировании во всех энергосистемах систем АРЧМ в режиме регулирования сальдо перетоков с коррекцией по частоте прекращение по какой-либо причине, в том числе и по причине исчерпания регулировочного диапазона, функционирования системы АРЧМ в какой-либо энергосистеме недопустимо, так как при этом имеют место длительные отклонения частоты и сальдо перетоков во всех энергосистемах. В практике УСРТЕ в этом случае энергосистема с нефункционирующей системой АРЧМ отделяется от энергообъединения (или же функции АРЧМ в ней принимаются в соседней энергосистеме).

В соответствии с требованиями к системам АРЧМ для обеспечения их нормального функционирования необходимо поддерживать необходимый суммарный регулировочный диапазон на загрузку и разгрузку регулирующих электростанций. При недостаточном регулировочном диапазоне диспетчер вынужден чаще давать дополнительные команды на изменение мощности электростанций, не подключенных к системе АРЧМ, для восстановления регулировочного диапазона.

**Выводы.** 1. Одним из основных условий надежной параллельной работы ЕЭС и энергосистемы Восточной Европы с энергообъединением Западной Европы является наличие эффективно действующих систем АРЧМ во всех энергообъединениях.

2. Исследования показали, что оба рассмотренных варианта координации режимов работы АРЧМ, осуществляемых в энергообъединениях, обеспечивают стабильность поддержания частоты и устойчивое потокораспределение по межсистемным связям.

Расчеты показывают, что предпочтительным является второй вариант — во всех трех энергообъединениях регулирование сальдо перетоков с коррекцией по частоте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматическое регулирование частоты и активной мощности в энергосистемах. Сб. статей под ред. Л.Д.Стернинсона. — М.: Л.: ГЭИ, 1960.
2. Анализ переходных процессов изменения частоты и перетоков мощности по межсистемным связям сложного энергообъединения с учетом влияния тепловых электростанций/С.В.Алексеев, А.М.Машанский, Р.С.Рабинович и др. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1978, № 5.
3. Алексеев С.В., Копылов И.Б., Машанский А.М. Описание энергообъединения как объекта управления режимом по частоте и активной мощности. — Электричество, 1980, № 12.
4. Беркович М.А., Комаров А.Н., Семенов В.А. Основы автоматики энергосистем. — М.: Энергоиздат, 1981.
5. Автоматизация регулирования частоты и активной мощности в Единой энергетической системе СССР/М.А.Беркович, А.Н.Комаров, С.А.Совалов и др. — Электричество, 1977, № 8.
6. Иерархическая система автоматического регулирования частоты и перетоков мощности в ЕЭС СССР/А.Н.Комаров, А.И.Максимов, С.А.Совалов и др. — Электрические станции, 1983, № 1.

[15.07.93]

*А в т о р ы : Бондаренко Александр Федорович окончил энергетический факультет Львовского политехнического института в 1968 г. Главный диспетчер Центрального диспетчерского управления Единой Энергосистемы (ЦДУ ЕЭС) России.*

*Комаров Анатолий Николаевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1960 г. Заместитель начальника службы релейной защиты и автоматики ЦДУ ЕЭС России.*

*Машанский Александр Михайлович окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1965 г. Заведующий сектором Научно-исследовательского института электроэнергетики.*

*Портной Марлен Гдальевич окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1952 г. В 1960 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Ресинхронизация в энергетических системах» в МЭИ. Начальник службы электрических режимов ЦДУ ЕЭС России.*

# Применение принципов экспертных систем для прогнозирования электропотребления

МЕЛАМЕД А.М., СКРИПКО О.А.

*Разработаны алгоритмические и программные средства оперативного (1–24 ч) и краткосрочного (сутки—неделя) прогнозирования электропотребления для планирования и оперативного управления режимами электроэнергетических систем, основанные на принципах экспертных систем. На представительном фактическом материале исследованы характеристики точности прогнозирования с помощью новых алгоритмов в сравнении с существующими. Показана принципиальная возможность решения задач прогнозирования электропотребления в экспертных системах. Описана программная реализация и опыт практического применения алгоритмов. Рассмотрены направления дальнейших исследований.*

*The algorithms and software have been developed for very short-term (1–24 h) and short-term (day—week) electrical load forecasting for planning and control of electric power systems operation, based on principles of expert systems. The accuracy indices of the new algorithms are investigated using representative actual data in comparison with existing methods. The practical usage experience of the new algorithms is described, and directions of their future developments are discussed.*

При всем разнообразии существующих в мировой практике методов прогнозирования электропотребления (ЭП) электроэнергетических систем (ЭЭС) в краткосрочном (сутки—неделя) и оперативном (внутрисуточном и внутрисуточном) временных диапазонах для решения задач планирования и оперативного управления режимами ЭЭС в АСДУ все они, как можно судить по опубликованным в последние годы обзорам [1, 2], основаны на традиционном статистическом подходе: моделирования и экстраполяции предшествующих изменений ЭП с помощью тех или иных статистических моделей.

Методы прогнозирования ЭП различаются глубиной используемой ретроспективы, способом выделения так называемой регулярной составляющей в изменениях ЭП, применяемыми статистическими моделями и процедурами оценивания их параметров и т.д., и в то же время имеют и ряд общих черт, обусловленных общностью задачи и общими свойствами прогнозируемых процессов. Имеющийся опыт сопоставления различных алгоритмов и анализ данных, представленных в литературных источниках, позволяют считать, что большинство известных методов дают в целом достаточно близкие результаты по точности прогнозирования.

Задача повышения точности прогнозирования ЭП, имеющая отчетливое технико-экономическое содержание [2], становится особенно актуальной в условиях происходящих изменений экономического механизма управления в отрасли и народном хозяйстве в целом. Поэтому поиск путей дальнейшего повышения точности прогнозирования ЭП ЭЭС представляет несом-

ненный интерес. Усовершенствование характеристик алгоритмов прогнозирования (адаптивности, надежности, экономичности, вычислительной эффективности и др. [2]) также остается актуальным, в особенности для онлайн-систем оперативного управления. Кроме того, при большом разнообразии условий функционирования, уровня и динамики изменения ЭП в ЭЭС особое значение имеет мобильность метода прогнозирования ЭП (в смысле обеспечения удовлетворительных результатов при применении в различных ЭЭС).

Один из альтернативных подходов к поиску новых возможностей развития методов прогнозирования ЭП — применение методологии и принципов так называемых экспертных систем [3]. Такие системы все более широко и успешно используются в разных областях науки, техники. В последние годы активно развивается применение экспертных систем в электроэнергетике [4], в частности, в задачах диспетчерского управления. Широта применения и эффективность экспертных систем как средства решения разнообразных задач позволяют предположить, что этот путь может оказаться перспективным и для задач прогнозирования ЭП ЭЭС. Об опыте применения «экспертного» подхода в этой области имеется пока только несколько зарубежных публикаций, например [5].

Экспертные системы (или алгоритмы, основанные на аналогичных принципах) позволяют, пусть и не в полной мере, формализовать приемы, которыми пользуется в своей практике при решении конкретных задач опытный специалист. Следует отметить, что повсеместно предъявляемое к алгоритмам прогнозирования

ЭП требование не уступать в точности «ручным» расчетам специалистов диспетчерских управлений ЭЭС отнюдь не является слабым, поскольку опыт и интуиция квалифицированных «прогнозистов» позволяют им достигать весьма высоких результатов [2]. Формализованный опыт специалистов-практиков может быть дополнен опытом и знаниями, полученными в ходе статистических исследований режимов ЭП разных ЭЭС и разработки алгоритмов прогнозирования; обобщение результатов таких исследований, в частности, выполненных во ВНИИЭ, может дать обширный и чрезвычайно полезный материал.

Как показывает многолетний опыт внедрения программ прогнозирования ЭП в энергоуправлениях, не последнюю роль в успешном и регулярном применении этих программ на практике играет фактор доверия специалистов к методу прогнозирования. Последнее непосредственно связано с простотой и понятностью для пользователя алгоритма прогнозирования ЭП, а также с интерактивными возможностями программной реализации, облегчающими специалисту-технологу получение приемлемого результата.

Несомненно, что использование любых формальных процедур в задачах управления, в частности, при прогнозировании ЭП, не может и не должно полностью исключать участие специалиста в оценке выданного программой результата и коррекции его при необходимости. А это требует от специалиста опыта и умения сделать такую оценку независимо от программы, что часто и происходит на практике. Если бы специалист имел достаточно простое средство, которое понятным для него способом позволяло выполнить эту функцию оценки результата, не требуя проведения трудоемких и сложных операций анализа предыстории ЭП, то принятие решения было бы более быстрым и обоснованным. Таким средством могла бы стать специализированная экспертная система.

Методология построения экспертных систем [3, 4] в значительной степени зависит от проблемной и даже предметной области. Исходя из специфики задач прогнозирования ЭП наиболее эффективной для этой области представляется экспертная система, которая органично объединяла бы как методы обработки знаний, так и средства вычислительной поддержки процесса решения. Это позволит использовать традиционные методы статистического моделирования в сочетании с относительно небольшим объемом знаний (правил), обеспечивая новое качество решения задачи. Важно также, что такой подход приближает непосредственного пользователя к механизму по-

лучения результата, повышая тем самым его доверие к прогнозирующей системе. Наличие в экспертной системе подсистемы объяснения, позволяющей дать обоснование полученного результата, может обеспечить более высокий уровень качества принимаемых решений. Кроме того, такая система могла бы использоваться для обучения специалистов в области прогнозирования ЭП.

**Постановка задачи.** Цель работы, выполнявшейся в рамках комплекса работ ВНИИЭ по применению экспертных систем в электроэнергетике [4], состояла в попытке создания алгоритмов прогнозирования ЭП ЭЭС во внутрисуточном (с упреждением от 1 до 24 ч) и краткосрочном (на предстоящие сутки—неделю) временных диапазонах с использованием подхода, характерного для экспертных систем, на основе анализа и обобщения известных из практики работы специалистов диспетчерских служб различных ЭЭС приемов предсказания ожидаемой нагрузки, а также опыта, накопленного во ВНИИЭ в ходе статистических исследований режимов ЭП, разработки и практического применения алгоритмов прогнозирования ЭП в ЭЭС.

Возможны различные пути реализации такого подхода. Так, можно использовать специализированную инструментальную программную среду для создания экспертных систем со всеми необходимыми компонентами (базой знаний, подсистемой логического вывода и т.д. [3, 4]). Другой возможный способ состоит в реализации знаний и правил в виде логических операций, дополненных при необходимости определенными вычислениями непосредственно в программном модуле, который может быть включен в существующие программные структуры для решения задач прогнозирования ЭП. В обоих случаях не обойтись без использования фактических данных о режимах ЭП ЭЭС за определенный прошедший интервал времени и некоторых вычислений. Последний способ, учитывая поисковый характер работы, представляется более предпочтительным, по крайней мере на этапе проведения исследовательских расчетов с целью выяснения возможностей новых алгоритмов; он и был реализован в данной работе.

Основными направлениями являлись исследование точности прогнозирования ЭП с помощью разработанных алгоритмов в различных условиях, анализ их вычислительных характеристик, сопоставление точности новых и существующих «статистических» методов для получения представления о принципиальных возможностях применения и путях дальнейшего развития «экспертного» подхода.

При разработке алгоритмов прогнозирования ЭП, основанных на принципах экспертных систем (в дальнейшем будем называть их экспертными алгоритмами — ЭА), к ним предъявлялись требования, общие для всех методов прогнозирования ЭП [2, 6], в том числе связанные с обработкой таких ситуаций, как нерегулярные (праздничные и примыкающие к ним) дни, перевод времени с «летнего» на «зимнее» и обратно и т.д., а также специфическое требование: использование ограниченного (не более четырех недель) объема ретроспективных данных о режимах ЭП (суточных графиков нагрузки, суточного ЭП) ЭЭС.

**Краткое описание алгоритмов.** Экспертные алгоритмы оперативного (с упреждением 1—24 ч) прогнозирования часовых нагрузок ЭЭС основаны на использовании воспроизводимости конфигурации суточных графиков нагрузки однотипных дней. Основная идея ЭА состоит в определении направления и оценки значения изменения нагрузки от часа к часу и предсказания нагрузок предстоящих часов с «опорой» на фактические значения нагрузки за последние истекшие часы. Направление и возможное изменение нагрузки оцениваются по данным интервала предыстории с применением специальных приемов фильтрации и взвешивания, усиливающих роль более свежих данных, а также ряда эвристических правил.

Используется только информация о часовых нагрузках ЭЭС. Данные о часовых температурах и показателях освещенности также могут быть использованы, хотя учет метеофакторов при оперативных прогнозах, как правило, не дает заметного эффекта [2].

Для обработки особых случаев, таких как переходы с «летнего» времени на «зимнее» или наоборот, нерегулярные (праздничные и примыкающие к ним) дни и другие, применяются специальные эвристические правила.

Экспертные алгоритмы краткосрочного (с упреждением сутки—неделя) прогнозирования оперируют данными о суточном ЭП и метеорологических показателях (среднесуточных температурах и освещенности на территории ЭЭС), а также данными о суточных графиках нагрузки ЭЭС за две—четыре последние истекшие недели. Суточное ЭП и температуры используются для оценки уровня ЭП на прогнозные дни с учетом заданного прогноза температуры. При этом (аналогично часовым нагрузкам в ЭА оперативного прогнозирования) по данным интервала предыстории оцениваются направление и значение изменения ЭП от одного дня недели к другому. Суточное ЭП предварительно «выравнивается» приведением к

средним температурам за рассматриваемый интервал времени; коэффициенты для такого приведения определяются по отклонениям суточного ЭП и температур от соответствующих средних значений (с учетом различий ЭП рабочих и выходных дней). При вычислении ожидаемого суточного ЭП используются полученная оценка изменения ЭП, «опорные» значения ЭП за один или несколько последних истекших дней, прогноз температуры и оценка «температурного» коэффициента.

Конфигурация суточного графика нагрузки определяется усреднением графиков за соответствующие однотипные дни интервала предыстории. При оценке как уровня суточного ЭП, так и конфигурации суточного графика применяются соответствующие способы фильтрации и взвешивания, а также некоторые эвристические правила. При прогнозировании суточных графиков и суточного ЭП на нерегулярные дни используются правила, учитывающие особенности режимов ЭП таких дней по сравнению с обычными днями.

Оба ЭА, как и все алгоритмы прогнозирования, чувствительны к ошибкам в исходных данных.

Для повышения надежности ЭА они снабжены специальной процедурой контроля данных интервала предыстории, основанной на тех же принципах, что и сами ЭА прогнозирования.

**Результаты экспериментальных расчетов.** Исследование точности ЭА проводилось с помощью специализированных программ ретроспективности оценки точности краткосрочного и оперативного прогнозирования ЭП, которые позволяют воспроизвести все необходимые условия технологии выполнения прогнозных расчетов в реальной практике планирования и оперативной коррекции режимов ЭЭС. В эти программы вместо программных модулей, реализующих существующие «статистические» алгоритмы, были включены альтернативные ЭА.

При разработке и тестировании ЭА, а также на начальном этапе исследования характеристик точности прогнозирования ЭП с помощью ЭА использовались фактические данные о режимах ЭП одной ЭЭС со среднегодовой нагрузкой примерно 5000 МВт, которая характеризуется существенной неравномерностью суточных и недельных графиков нагрузки и значительными сезонными изменениями уровня ЭП и конфигурации суточных графиков нагрузки. Для анализа были выбраны четыре недельных интервала времени (чтобы можно было судить о точности прогнозирования для всех дней недели) из разных сезонов года (зима, весна, лето, осень), а также несколько интервалов, включающих «осо-

бые» условия: нерегулярные дни и периоды ввода и отмены «летнего» времени. Выполнялись ретроспективные прогнозные расчеты суточного ЭП и часовых нагрузок с разным упреждением на каждый час каждого суток выбранного интервала времени. При этом вычислялись абсолютные (МВт) и относительные (%) ошибки прогнозирования и их статистические характеристики: средняя относительная ошибка, среднеквадратичная ошибка и смещение ошибок [2]. Последняя характеристика является обобщающей, поскольку учитывает как средний уровень ошибок, так и их разброс. Для широкомасштабной проверки полученных на первом этапе предварительных результатов использовались фактические данные об ЭП примерно двадцати ЭЭС различной мощности из ОЭС Юга, Средней Волги, Северного Кавказа, Урала, Сибири и Востока. Ретроспективные прогнозные расчеты с разным упреждением выполнялись для различных сезонов и интервалов времени, включающих указанные выше особые условия.

Особый интерес представляло сопоставление с характеристиками точности широко апробированных на практике «статистических» алгоритмов [2, 6]. Основные результаты обобщены в виде зависимостей характеристик точности прогнозирования от мощности ЭЭС (ОЭС).

Чтобы не перегружать статью иллюстративным материалом, ограничимся лишь тремя иллюстрациями, достаточными для демонстрации принципиальных возможностей ЭА.

Дата	День недели	Среднеквадратичная ошибка прогнозирования часовых нагрузок одной из ЭЭС	
		по «экспертному» алгоритму	по «статистическому» алгоритму
16.03	Воскресенье	2,64	2,39
17.03	Понедельник	1,97	1,97
18.03	Вторник	1,90	1,86
19.03	Среда	1,17	1,51
20.03	Четверг	1,21	1,35
21.03	Пятница	0,93	1,09
22.03	Суббота	2,38	2,22
16.06	Понедельник	2,20	2,04
17.06	Вторник	2,33	1,84
18.06	Среда	1,47	2,00
19.06	Четверг	1,56	1,20
20.06	Пятница	1,57	1,98
21.06	Суббота	1,73	1,95
22.06	Воскресенье	1,73	2,86
16.09	Вторник	2,01	2,37
17.09	Среда	2,22	2,46
18.09	Четверг	2,39	2,21
19.09	Пятница	2,23	2,40
20.09	Суббота	1,86	2,36
21.09	Воскресенье	3,13	3,51
22.09	Понедельник	2,76	2,78
15.12	Понедельник	0,69	1,22
16.12	Вторник	1,0	1,17
17.12	Среда	0,85	1,02
18.12	Четверг	1,30	1,27
19.12	Пятница	0,82	0,89
20.12	Суббота	2,09	1,99
21.12	Воскресенье	2,19	2,14

В таблице показаны среднеквадратичные ошибки прогнозирования часовых нагрузок одной ЭЭС, рассчитанные с помощью ЭА и по известному алгоритму [6] для прогнозов с минимальным упреждением 1 ч. По этим данным можно судить о том, что точность прогнозирования по предложенному ЭА не уступает, а в большинстве случаев превосходит точность «статистического» метода.

На рис. 1 приведены обобщающие зависимости среднеквадратичного смещения относительных ошибок прогнозирования часовых нагрузок зимнего рабочего дня, дающие возможность сопоставить точность двух рассматриваемых ЭА; среднеквадратичное смещение относительных ошибок оценивалось за 24 ч. «Оперативный» ЭА, как правило, обеспечивает уточнение по сравнению с «суточными» прогнозами.

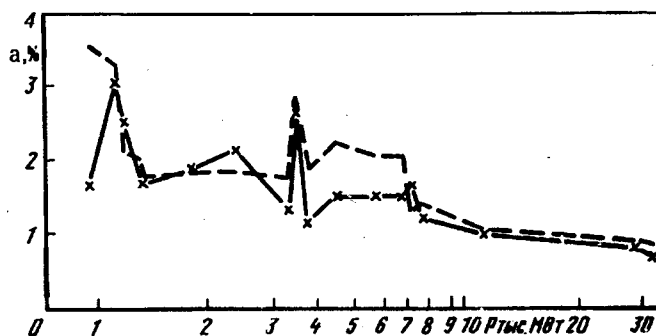


Рис. 1. Среднеквадратичное смещение относительных ошибок прогнозирования суточных графиков нагрузки в зависимости от среднегодовой нагрузки ЭЭС (середина 10.02.88): × — ЭА оперативного прогнозирования, упреждение 1 ч; • — ЭА краткосрочного прогнозирования, упреждение 1 сут

Рис. 2 иллюстрирует результаты сопоставления среднеквадратичных ошибок прогнозов суточного ЭП по ЭА краткосрочного прогнозирования

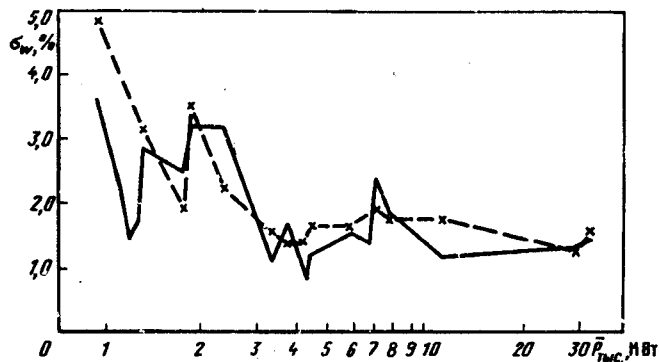


Рис. 2. Среднеквадратичная ошибка прогнозирования суточного электропотребления в зависимости от среднегодовой нагрузки ЭЭС (01.02.88—14.02.99, упреждение 1 сут): • — ЭА кратковременного прогнозирования; × — «статистический» алгоритм

ния и «статистическому» алгоритму [2, 6]. Опыт расчетов показал, что оба алгоритма дают близкую точность воспроизведения конфигурации суточных графиков нагрузки, поэтому достаточно сопоставить точность прогнозирования суточного ЭП.

Анализ полученных результатов позволяет достаточно уверенно считать, что ЭА обеспечивают точность прогнозирования ЭП, не уступающую точности методов, основанных на традиционном «статистическом» подходе. Характер зависимости показателей точности прогнозирования от уровня ЭП в ЭЭС сохраняется [2]: с ростом мощности ЭЭС точность увеличивается. Точность прогнозирования для рабочих дней в среднем выше, чем для суббот, воскресений и тем более нерегулярных дней, однако разница в точности в случае применения ЭА несколько меньше. Существенной особенностью ЭА является более медленное (по сравнению со «статистическими» методами) снижение точности при увеличении времени упреждения. Как показали экспериментальные расчеты, затраты вычислительных ресурсов (времени счета, оперативной памяти ЭВМ), а также необходимый объем исходных данных при использовании ЭА существенно уменьшаются. Кроме того, ЭА обеспечивают более высокие надежность (в смысле вероятности получения достоверного результата в некоторых специфических ситуациях) и адаптивность (в смысле чувствительности к неожиданным изменениям уровня ЭП и конфигурации графиков нагрузки).

Последнее подтверждается результатами прогнозирования ЭП в ЭЭС, на территории которой на достаточно продолжительный период были введены «плавающие» выходные дни в разных административных районах. При этом существенно изменился уровень ЭП и характер графиков суммарной нагрузки ЭЭС для всех дней недели. В этих условиях «статистический» метод краткосрочного прогнозирования не давал удовлетворительных для практики результатов. Использование в опытном порядке ЭА краткосрочного прогнозирования позволило снизить ошибки до приемлемого уровня.

**Практическая реализация.** Первые варианты ЭА в виде программных модулей были включены в действующие программы краткосрочного и оперативного прогнозирования ЭП для универсальных ЭВМ (серии ЕС) [6] и переданы в опытную эксплуатацию в одно из районных энергоуправлений и в одно ОДУ. Доработанные с учетом примерно полугодичного опыта их практического применения ЭА были затем реализованы в составе комплекса программных средств анализа и прогнозирования ЭС с помощью персональных ЭВМ (ПЭВМ), в котором обеспечивается решение задач прогнозирования

ЭП во всех временных диапазонах, необходимых для планирования режимов ЭЭС и оперативного управления (от предстоящего года до текущих суток), на основе общей информационной базы и единой системы моделей и алгоритмов. В настоящее время эти программные средства успешно эксплуатируются в ряде районных энергоуправлений и ОДУ, причем ЭА обеспечивают удовлетворительные результаты прогнозирования даже в нынешних условиях быстрых изменений структуры ЭП и резких нарушений нормального функционирования экономики. Богатые интерактивные возможности ПЭВМ повышают эффективность использования программ не только как средств прогнозирования, но и как инструмента для решения ряда практических задач, необходимых для планирования режимов ЭЭС.

При дальнейшем развитии методов и программных средств прогнозирования ЭП, в том числе с использованием экспертных систем, представляется необходимым исследование динамики изменения ЭП по отдельным группам потребителей электроэнергии для учета структуры ЭП при прогнозировании, особенно в долгосрочном временном диапазоне (месяц—квартал—год) — для планирования режимов работы ЭЭС и обеспечения коммерческой деятельности энергоуправлений при переходе на новые экономические отношения как между ЭЭС и потребителями электроэнергии, так и между ЭЭС и энергообъединениями.

**Выводы.** 1. Полученные результаты, а также первый опыт практического применения ЭА подтверждают принципиальную возможность прогнозирования ЭП с использованием экспертных систем. Предложенные ЭА представляют собой только первый шаг в этом направлении; они имеют большие возможности развития и совершенствования за счет расширения и усложнения применяемых правил и эвристических решений, в том числе с привлечением опыта и знаний более широкого круга специалистов.

2. Разработанные ЭА могут быть включены в создаваемые экспертные системы для решения задач диспетчерского управления ЭЭС, например с использованием существующих инструментальных средств [4].

3. Представляет несомненный интерес применение ЭА для прогнозирования ЭП во внутрисуточном диапазоне для задач реального времени; при большей дискретности измерений нагрузки можно ожидать и большей точности прогнозирования.

4. В условиях происходящих изменений экономических механизмов, сложившейся структуры и традиционных режимов ЭП в ЭЭС при прогнозировании ЭП необходимо учитывать динамику изменения структуры ЭП.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления электроэнергетическими системами/ О.Н.Войтов, В.Н.Воронин, А.З.Гамм и др. — Новосибирск: Наука, 1986.
2. Вчерашний В.П., Меламед А.М., Семенов В.А. Прогнозирование и управление электропотреблением в электроэнергетических системах: Итоги науки и техники. — М.: ВИНТИ, 1988.
3. Экспертные системы. Принципы работы и примеры/ Под ред. Р.Форсайта. Пер с англ. — М.: Радио и связь, 1987.
4. Экспертные системы для энергетики/Ю.Я.Любарский, В.М.Надточий, Р.С.Рабинович и др.— Электричество, 1991, № 1.
5. Rahman S., Bhatnagar R. An expert system based algorithm for short-term load forecast. — IEEE Trans. PS, v.3, № 2, 1988, p.392—399.
6. Меламед А.М., Скрипко О.А. Прогнозирование нагрузок электроэнергетических систем для задач оперативного управления. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1989, № 2.

[02.02.93]

Авторы: Меламед Александр Мордкович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1973 г. В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Анализ и прогнозирование годовых режимов электропотребления энергосистем» в научно-исследовательском институте электроэнергетики (ВНИИЭ). Заведующий сектором ВНИИЭ.

Скрипко Олег Афанасьевич окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1980 г. Старший научный сотрудник ВНИИЭ.

## Психологические аспекты построения экспертных систем

НАДТОЧИЙ В.М.

Рассматривается процедура приобретения знаний как информационный обмен между источником (эксперт) и приемником («инженер знаний»), обладающими индивидуальными информационными ритмами. Устойчивый психологический контакт может возникнуть, только если контактная пара имеет определенное соотношение информационных ритмов, обеспечивающее «информационный резонанс» процесса обмена. Для успешного приобретения знаний у эксперта инженер знаний должен обладать способностью автоматически настраиваться на информационный ритм партнера.

In this paper a procedure of knowledge getting is considered as information exchange between a generator (expert) and receiver (knowledge engineer) which have their own individual information rhythms. Stable psychological contact is attainable if partners information rhythms relation causes exchange procedure «information resonance». To obtain appropriate knowledges from expert the knowledge engineer must be able to tune himself in information rhythm of the partner by respective way.

Экспертные системы находят широкое применение во многих странах в самых различных областях, в том числе и в технической диагностике оборудования энергообъектов [1]. Они работают как системы-советчики, т.е. являются фактически «искусственными консультантами», помогающими пользователю принимать наилучшие решения в нетривиальных ситуациях, когда вероятна нехватка профессиональных знаний или когда в момент принятия решения имеет место психологически неустойчивая обстановка.

Экспертные системы диагностики базируются, как правило, на знаниях высококвалифицированных специалистов-экспертов. Строго говоря, любые диагностические системы основаны на профессиональных знаниях в соответствующей предметной области. Различие заключается

главным образом в том, что при построении экспертных систем диагностики используют обычно неформализованные или плохо формализованные знания, тогда как в традиционных системах диагностики — довольно хорошо формализованные знания.

Приобретение неформализованных знаний у квалифицированных экспертов составляет основную трудность при формировании прикладных экспертных систем и является главным препятствием на пути их широкого распространения.

Характерным примером в этом отношении является проблема оценки эксплуатационного состояния изоляции крупных электрических машин. Трудности общеизвестны: критерии интегральной оценки состояния отсутствуют, а существующие методы инструментального контроля

(измерение частичных разрядов, токов утечки, коэффициента потерь, хроматографический анализ охлаждающих сред и т.д.) затрагивают лишь отдельные характеристики состояния, не всегда коррелирующие между собой. Даже результаты, получаемые широко распространенным методом — измерениями частичных разрядов, требуют большого опыта для их интерпретации и вызывают неоднозначные оценки у разных специалистов. Помимо инструментальных методов существенным источником информации для оценки состояния изоляции являются результаты профилактического обслуживания обмоток, в том числе осмотров, ремонтов, испытаний. Интерпретация результатов обслуживания также представляет большие трудности и под силу лишь опытным экспертам.

В силу указанных причин для оценки состояния изоляции или анализа причин пробоя обмоток крупных электрических машин, как правило, приглашаются высококвалифицированные специалисты, которые умеют анализировать весьма «размытую», плохо формализованную информацию об «истории жизни» обмоток. Ясно, что было бы очень заманчиво иметь под рукой экспертную систему-советчика, в которой был бы отражен опыт таких специалистов-экспертов. Однако подобных систем в эксплуатации пока нет, что связано прежде всего с трудностями алгоритмизации плохо формализованных знаний в этой области. Для построения же алгоритмов экспертной системы требуется понять, каким образом эксперт анализирует информацию и на основе каких оценок этой информации он приходит к заключительному решению.

Таким образом, процедура приобретения знаний у экспертов в задачах подобного типа становится ключевой. Ключевым звеном при формировании прикладной экспертной системы являются специалисты особой профессии — «инженеры знаний», т.е. посредники между экспертом и пользователем. Процесс построения экспертной системы в основе своей зависит от успешного взаимодействия трех интеллектуальных звеньев: «эксперт—посредник—пользователь». При этом очевидно, что огромное значение должны иметь не только уровни профессиональных знаний участников процесса, но и психологические аспекты взаимодействия звеньев «интеллектуального треугольника». Опыт автора свидетельствует, что психологические особенности эксперта и его состояние в момент контакта с посредником заметно влияют на способность эксперта к объективному анализу ситуаций и принятию правильного решения.

К сожалению, в обширной литературе по экспертным системам не рассматриваются психо-

логические аспекты их построения, хотя во многих публикациях подчеркивается, что приобретение знаний является главной и наиболее трудной проблемой при формировании экспертных систем [2, 3].

Опыт показывает, что поскольку речь нередко идет о «сокровенных» знаниях профессионала, то приобретение их может наталкиваться на ряд серьезных препятствий, к числу которых относятся:

- нежелание эксперта до конца раскрывать профессиональные тайны;

- неумение эксперта ясно изложить логику своих рассуждений («парадокс эрудитов»);

- недопонимание конечной цели, ради которой знания отдаются;

- неспособность посредника воспринять логику эксперта и оценить ее справедливость.

Преодоление трудностей такого рода возможно только на пути установления психологического контакта между экспертом и посредником. Ключевую роль играет посредник: именно он должен настраиваться на психологический контакт с экспертом, способствуя созданию для эксперта атмосферы психологического раскрепощения. Последнее имеет особое значение, ибо, как показал опыт, в этом случае посредник может более тонко почувствовать логику мышления эксперта, особенности связи его фактологических знаний и интуиции и, как следствие, построить более достоверный алгоритм его рассуждений. Разумеется, посредник должен сам достигнуть определенного уровня знаний в данной проблемной области, чтобы свободно общаться с экспертом на его профессиональном языке. Однако главная проблема все же остается в области установления психологического контакта между посредником и экспертом.

Процесс приобретения знаний является процессом взаимного обмена информацией между двумя равнозначными звеньями. Нельзя считать эксперта только источником информации, а посредника — только приемником: конечный информационный продукт (логические алгоритмы) является результатом совместного творчества, в процессе которого эксперт и посредник попеременно предстают то как источник, то как приемник информации (эксперт излагает свои знания, посредник помогает их алгоритмизировать).

Важно уяснить, что информационный обмен происходит не только на уровне сознания, но и на подсознательном, интуитивном уровне. При этом, если уровень сознания определяет, в основном, свободу общения на профессиональном языке, то качество приобретаемых знаний, а следовательно и эффективность экспертной систе-

мы, зависит преимущественно от развития под-сознательного, интуитивного уровня участников информационного обмена. Последнее относится в первую очередь к посреднику и определяет тот факт, что далеко не каждый специалист может быть «инженером знаний».

Для того чтобы процесс приобретения знаний был эффективным, требуется некоторое время, в течение которого посредник и эксперт должны установить психологический контакт. Этот период посредник должен использовать для настройки на интуитивный канал эксперта. Посреднику необходимо ощутить информационный ритм эксперта.

Наблюдения показывают, что каждый человек обладает своим информационным ритмом, который характеризуется чередованием периодов выдачи и приема информации. Крайние случаи очевидны: у того, кто умеет слушать, но не умеет или не любит излагать свои мысли, период приема информации может быть нескончаем, а период выдачи информации — близок к нулю. Такой специалист не может быть экспертом, на базе знаний которого следует строить экспертную систему. Идеальным экспертом с точки зрения приобретения у него знаний является такой, у которого собственный информационный ритм достаточно равномерен и он умеет этим ритмом хорошо управлять.

Одной из важнейших задач посредника как раз и является выявление информационного ритма эксперта и обеспечение взаимной подстройки этих ритмов. Если, например, у эксперта период выдачи информации больше, чем период приема, то посредник должен настроиться на противоположный ритм. В этом случае эксперт и посредник образуют психологически устойчивую контактную пару и процесс обмена информацией резко усиливается. Активизируется деятельность интуитивных каналов, происходит как бы взаимная подзарядка энергии этих каналов, эксперт и посредник начинают понимать друг друга «с полуслова». Можно сказать, что интуитивные каналы участников информационного обмена входят в своеобразный информационный резонанс и взаимное общение в такие моменты может доставлять обоим истинное наслаждение.

Указанные аспекты составляют суть метода интервью, широко используемого при формировании экспертных систем в качестве основы для процедуры приобретения знаний. Удачный подбор пары «эксперт—посредник», вошедшей в устойчивый психологический контакт, позволяет сделать эффективным процесс приобретения знаний для весьма сложных технологических задач, характеризующихся чрезвычайно «размытыми» зна-

ниями, и получить при этом логические алгоритмы четкого и понятного для пользователя вида.

В практике автора наиболее показательным примером в рассматриваемом аспекте является организация разработки экспертной системы ЭСТРИ для оценки состояния термореактивной изоляции обмотки статора гидрогенератора (эксперт — канд. техн. наук Кулаковский В.Б., «инженер знаний» — Зозулинский Е.Б.).

Разработка прототипного варианта ЭСТРИ заняла три года. Первый год фактически был затрачен на установление информационного (профессионального и психологического) контакта между экспертом и посредником и на формирование макета экспертной системы. В течение второго года было создано уже четыре рабочие модели ЭСТРИ, посвященные отдельным характеристикам состояния изоляции (увлажнению, истиранию, озонированию, причинам пробоя), а в течение третьего года — наиболее сложная модель экспертной системы, учитывающая совокупные результаты осмотров обмотки статора. В процессе взаимного общения экспертом и посредником переработан огромный объем информации [4], что оказалось возможным только благодаря удачной взаимной настройке интуитивных каналов, обеспечившей их плотный информационный контакт.

С другой стороны, известны случаи, когда разработка экспертных систем прекращалась из-за неумения получить от квалифицированных специалистов знания, необходимые для построения экспертных систем, что в свою очередь было связано с недооценкой роли посредника и необходимости его настройки на психологический контакт с экспертом.

Существенным является и информационный контакт посредника с пользователем. Этот контакт имеет свои особенности, обусловленные тем, что учитывать приходится в основном групповой психологический портрет пользователя (профессиональные, национальные, региональные и другие аспекты), а не индивидуальные свойства отдельных специалистов. Это приводит, например, к необходимости тщательного редактирования диагнозов и рекомендаций, вырабатываемых экспертной системой. В аспекте психологии пользователя особые трудности вызывает построение объяснительной функции, которая является необходимым атрибутом экспертной системы и значительно повышает доверие пользователя к ней.

В отечественной и зарубежной практике известны случаи, когда неучет разработчиками психологии пользователя приводил к неприятию персоналом электростанций диагностических эк-

спертных и информационных диалоговых систем. Специфика психологических аспектов информационного взаимодействия посредника и пользователя является предметом специального рассмотрения.

**Выводы.** 1. Ключевым моментом в процедуре приобретения знаний для экспертной системы является эффективное функционирование информационной связки «эксперт—посредник—пользователь», что может быть обеспечено только при учете психологических аспектов взаимодействия участников информационного обмена.

2. Основная роль в «интеллектуальном треугольнике» принадлежит посреднику—«инженеру знаний», который должен обладать способностью настраиваться на информационный ритм партнера, обеспечивая таким образом психологически устойчивую контактную пару.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надточий В.М. Экспертные системы диагностики электрооборудования. — Электричество, 1991, № 8.
2. A progress report on practical use of expert systems in planning and operation/ C.C.Lin, R.Adapa, etc. — CIGRE Session, Task Force 38.03.10, Paris, 1992.
3. Надточий В.М. Экспертные системы технической диагностики. — Энергохозяйство за рубежом, 1991, № 5.
4. Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах. — М.: Энергоиздат, 1981.

[14.10.92]

*Автор: Надточий Виктор Михайлович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1957 г. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Механические проблемы роторов турбогенераторов» в Тбилисском политехническом институте. Заведующий сектором Научно-исследовательского института электроэнергетики (ВНИИЭ).*

## Применение на линиях ограничителей междуфазовых и фазовых перенапряжений

АЛЕКСАНДРОВ Г.Н., ЕВДОКУНИН Г.А.

*Легкие и механически прочные нелинейные ограничители перенапряжений в полимерных корпусах могут быть подвешены непосредственно к проводам линий электропередачи, например, под поддерживающими гирляндами изоляторов. При этом могут быть ограничены как фазовые, так и междуфазовые перенапряжения. Анализ протекающих токов через ограничители при различных коммутациях позволил установить оптимальное соотношение количества фазовых и междуфазовых ограничителей, устанавливаемых непосредственно на линиях. Это соотношение установлено исходя из требования одинакового уровня ограничения перенапряжений относительно земли и между фазами.*

В соответствии со сложившейся практикой ограничение коммутационных и грозовых перенапряжений осуществляется с помощью разрядников и нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН), располагаемых на подстанциях по концам коммутируемого участка линий. При этом аппараты подключаются между фазными проводами и землей. Такой способ ограничения перенапряжений имеет ряд недостатков.

Прежде всего ОПН, установленные на под-

*Very light and mechanical solid metal oxide arresters in polimeric body can be suspended directly to the line conductors, for example, under the supporting insulators string. In this case it is possible to limit as phase-to-ground, as phase-to-phase overvoltages. The analysis of the current through phase-to-ground and phase-to-phase arresters for different type of commutations allows to establish the optimum relation between the quantity of phase-to-ground and phase-to-phase arresters. This relation is obtained taking into account the requirement of equal level of phase-to-ground and phase-to-phase overvoltages.*

станциях, обеспечивают заданный уровень ограничения коммутационных перенапряжений только в месте их установки. Перенапряжения на линии больше, чем на ограничителе, причем это различие возрастает при увеличении длины линии. Следовательно, для ограничения коммутационных перенапряжений до заданного уровня на линии уровень их ограничения на подстанциях должен быть ниже.

Кроме того, уровень ограничения междуфазовых перенапряжений даже в месте установки

ОПН больше уровня ограничения перенапряжений относительно земли. Действительно, при совпадении коммутационных перенапряжений противоположной полярности на соседних фазах, ограниченных до уровня фаза—земля,  $K_{огр.ф-з} U_{ф-з}$  междуфазовое перенапряжение достигает уровня  $2K_{огр.ф-з} U_{ф-з}$ , что соответствует кратности ограничения междуфазовых перенапряжений:

$$K_{огр.ф-з} = \frac{2K_{огр.ф-з} U_{ф-з}}{\sqrt{3} U_{ф-з}} = \frac{2}{\sqrt{3}} K_{огр.ф-з},$$

где  $U_{ф-з}$  — амплитуда наибольшего рабочего напряжения относительно земли.

Расчеты и измерения в действующих сетях подтверждают этот результат: кратность междуфазовых перенапряжений на 15% выше перенапряжений относительно земли. Для линий обычной конструкции, когда междуфазовые расстояния определяются суммой необходимых изоляционных расстояний до заземленных элементов опоры (стойка, траверсы) это обстоятельство не имеет значения. Однако для компактных линий без заземленных элементов опоры в междуфазовом пространстве уровень междуфазовых перенапряжений ограничивает возможность уменьшения междуфазовых расстояний. Поэтому повышение уровня междуфазовых перенапряжений по отношению к фазовым приводит к увеличению междуфазовых расстояний на компактных линиях. Такое повышение уровня междуфазовых перенапряжений приводит и к увеличению междуфазовых расстояний на подстанциях: между аппаратами соседних фаз, между проводами ошиновки. В результате значительно увеличивается занимаемая подстанцией площадь.

В связи с этим разрабатывались предложения по изменению конструкции ОПН для обеспечения более глубокого ограничения междуфазовых перенапряжений [1].

Однако более целесообразным и более эффективным является применение ОПН, включаемых непосредственно между соседними фазами. Такая возможность обеспечивается при использовании одноколonoквых ОПН подвесного типа, рассмотренных в [2, 3]. В этом случае количество последовательных варисторов в междуфазовых ОПН должно быть в  $\sqrt{3}$  больше, чем в фазовых, а их пропускная способность должна быть определена в результате соответствующих расчетов.

Выполненные расчеты на ЭВМ по программе RVP, разработанной в СПГТУ показали, что, например, при установке по концам компактной линии 500 кВ длиной 420 км в дополнение к двум комплектам фазовых ОПН, двух ком-

плектов междуфазовых ОПН такой же пропускной способности (с варисторами той же площади) и с одинаковым уровнем ограничения перенапряжений ( $1,8U_{ф-з}$  и  $1,8U_{ф-ф}$ ) максимальные перенапряжения между фазами на линии снижаются с  $2,3U_{ф-ф}$  до  $2U_{ф-ф}$ , где  $U_{ф-ф}$  — амплитуда наибольшего рабочего линейного напряжения. При этом снижаются и максимальные фазовые перенапряжения с  $2U_{ф-з}$  до  $1,9U_{ф-з}$ .

Оценим токи через ОПН по формулам приложения (П-1÷П-3) применительно к упомянутой компактной линии 500 кВ с параметрами  $z_{в1}=136$  Ом,  $z_{в0}=567$  Ом,  $z_{11}=280$  Ом и  $z_{12}=144$  Ом [4].

При этом для  $U_{огр.ф-з}=1,8U_{ф-з}$  и  $U_1=1,3U_{ф-з}$  (с учетом несимметрии) по формуле (П-1) получим ток через ОПН  $I_{ф-з}=1,17$  кА. Для сравнения в случае ВЛ 500 кВ обычного исполнения с параметрами  $z_{в1}=270$  Ом,  $z_{в0}=570$  Ом  $I_{ф-з}=0,88$  кА, что несколько меньше.

Ток в междуфазовом ОПН оценим по формуле (П-2) для случая  $U_1=U_{ф-з}$ ;  $U_2=-U_{ф-з}$  и  $U_{огр.ф-ф}=1,8\sqrt{3}U_{ф-з}$ ; при этом

$$I_{ф-ф} = \frac{2-0,5 \cdot 1,8\sqrt{3}}{136} \cdot 408 = 1,33 \text{ кА.}$$

Для сравнения в случае ВЛ 500 кВ обычного исполнения расчетное значение тока через ОПН значительно меньше:  $I_{ф-з}=0,67$  кА, т.е. примерно вдвое меньше.

Такое значительное увеличение тока КЗ через ОПН между фазами компактной линии определяется увеличением запасаемой энергии в электрическом поле между фазами увеличенных размеров с увеличенным числом проводов [4]. Ток через фазовый ОПН возрастает значительно меньше, так как электрическое поле относительно земли меняется сравнительно мало.

При наличии КЗ на одной из фаз ток через ОПН на свободном конце неповрежденной фазы оценен по формуле (П-3) при  $U_1=U_{ф-з}$  и  $U_3=-0,5U_{ф-з}$ . При этом получим  $I_{ф-зКЗ}=2,4$  кА, что значительно превышает ток через ОПН при отсутствии КЗ. С другой стороны, ток через междуфазовый ОПН в этом случае согласно формуле (П-2) равен нулю. Для сравнения на линии 500 кВ обычного исполнения  $I_{ф-зКЗ}=1,43$  кА, т.е. почти вдвое меньше, чем для компактной линии.

Таким образом, пропускная способность фазовых ОПН определяется коммутациями линии с однофазным КЗ, а междуфазовых ОПН — коммутациями без КЗ. В обоих случаях токи

для компактных линий значительно превосходят токи для линий обычного исполнения, что необходимо учитывать при разработке средств ограничения перенапряжений для компактных линий.

Следует иметь в виду, что несмотря на наглядность оценок по формулам (П-1)÷(П-3) они дают несколько завышенные, предельные значения токов через ОПН, поскольку здесь приближенно учитываются характеристики ОПН, линии и концевых устройств. Точнее могут быть получены токи через ОПН в результате расчетов на ЭВМ с учетом вольт-амперных характеристик ОПН.

В качестве примера на рис. 1, 2 приведены расчетные осциллограммы наибольших токов в одной из фаз ОПН фаза—земля (кривая 1) и

ОПН фаза—фаза, установленных в конце линии в коммутации включения компактной линии (рис. 1), а при включении на однофазное КЗ на рис. 2. Как видно, в этой несимметричной коммутации междуфазовый ОПН практически не работает. Максимальные значения токов через фазовые и междуфазовые ОПН, полученные в результате расчетов на ЭВМ, приведены в табл. 1. Эти данные показывают, что в схемах с реальными характеристиками ОПН возможна одновременная работа ОПН фаза—земля и фаза—фаза, что приводит к перераспределению токов в аппаратах, и как следствие, к снижению тока в ОПН фаза—земля и сокращению длительности его протекания. Но возможны перенапряжения, не приводящие к перераспределению токов (например, при однофазном КЗ), когда при наличии междуфазовых ОПН через фазовые ОПН протекают такие же токи, как и без них.

Таблица 1

Расчетный случай	Расчетные параметры			
	Максимальный уровень фазовых перенапряжений	Максимальный уровень междуфазных перенапряжений	Максимальный ток в ОПН $I_{ф-з}$ кА	Максимальный ток в ОПН $I_{ф-ф}$ кА
ОПН <sub>ф-з</sub> по концам	$\frac{1,8}{2,0}$	$\frac{2,1}{2,3}$	2,0	—
ОПН <sub>ф-з</sub> и ОПН <sub>ф-ф</sub> по концам	$\frac{1,8}{1,9}$	$\frac{1,8}{2,0}$	2,0	1,3
Распределенные ОПН <sub>ф-з</sub>	$\frac{1,8}{1,8}$	$\frac{2,1}{2,1}$	0,50	—
Распределенные ОПН <sub>ф-з</sub> и ОПН <sub>ф-ф</sub>	$\frac{1,8}{1,8}$	$\frac{1,8}{1,8}$	0,50	0,30

Примечание. Для  $K_{огр.ф-з}$  и  $K_{огр.ф-ф}$  в числителе указаны параметры на конце линии, в знаменателе — максимальная кратность на линии.

Разработанные в лаборатории СВН СПГТУ подвесные одноколонковые ограничители позволяют применять их непосредственно на линии, устанавливая их в отдельных точках вдоль линии на одинаковом расстоянии один от другого. Расчеты на ЭВМ были выполнены при установке шести подвесных ОПН вдоль указанной выше линии 500 кВ на расстоянии 80 км один от другого. Пропускная способность каждого из шести одинаковых ОПН подбиралась таким образом, чтобы обеспечить во всех точках присоединения ОПН примерно одинаковый уровень ограничения перенапряжения  $K_{огр} \approx 1,8$ . При этом расчеты были выполнены как при отсутствии, так и при наличии междуфазовых ОПН.

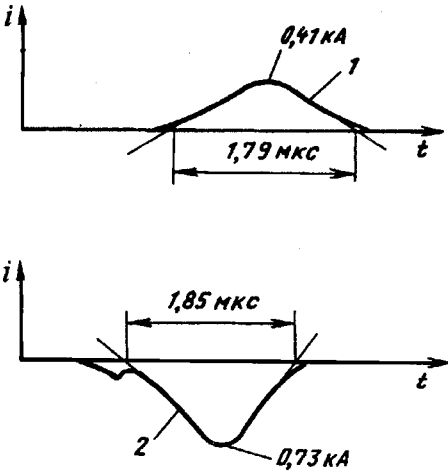


Рис. 1. Ток в ОПН фаза—земля, установленном в конце компактной линии 500 кВ при коммутации включения (1), ток в ОПН фаза—фаза (2)

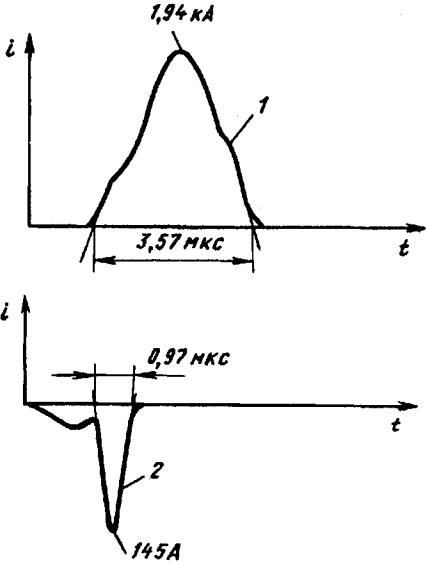


Рис. 2. Ток в ОПН фаза—земля, установленном в конце компактной линии 500 кВ при коммутации включения на однофазное КЗ (1), ток в ОПН фаза—фаза (2)

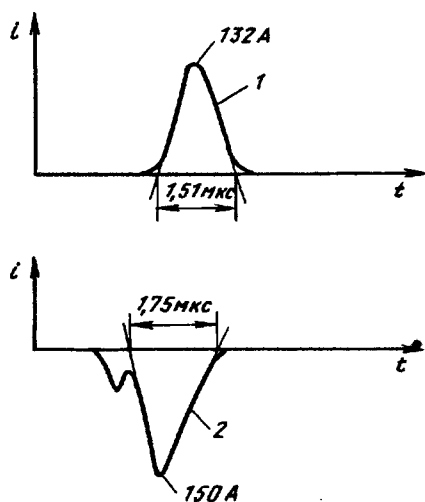


Рис. 3. Ток в одном из шести комплектов равномерно распределенных вдоль линии ОПН фаза—земля при включении компактной линии (1), ток в ОПН фаза—фаза (2)

На рис. 3 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы токов в одном из шести комплектов ОПН фаза—земля (кривая 1) и фаза—фаза (кривая 2), установленных равномерно по линии в шести ее точках. Результаты расчетов помещены в табл. 1. В обоих вариантах расчетов наибольшие токи протекают через ОПН, расположенные вблизи свободного конца линии. Эти токи оказываются значительно меньше, чем при наличии ОПН только по концам линии, вследствие параллельной работы всех ОПН на линии. Сократилась и длительность импульсов тока через ОПН. Однако сумма наибольших значений токов через все ОПН на линии оказалась больше, чем через один ОПН на разомкнутом конце линии из-за более глубокого ограничения перенапряжений на линии.

При установке только фазовых ОПН междуфазовые перенапряжения ограничиваются до уровня  $K_{огр.ф-ф} = 1,15 \cdot 1,8 \approx 2,1$ . Установка междуфазовых ОПН позволяет ограничить и междуфазовые перенапряжения до уровня  $K_{огр.ф-ф} = 1,8$ .

Исходя из полученных данных можно предложить соотношение для определения необходимого числа подвесных ОПН на линии:

$$n = \frac{1,5 I_{соср}}{I_{расп}}, \quad (1)$$

где  $I_{соср}$  — пропускная способность ОПН, устанавливаемых только по концам линии;  $I_{расп}$  — пропускная способность каждого из распределенных вдоль линии ОПН.

Из этого соотношения следует, что установка ОПН непосредственно на линии приводит к экономии варисторов, поскольку вместо двойного комплекта при расположении ОПН по концам линии необходимо распределить вдоль линии

полупортный комплект. При этом достигается эффект более глубокого ограничения перенапряжений вдоль линии, тем значительнее, чем больше длина линии.

При наличии междуфазовых ОПН необходимое число ОПН на линии сокращается в соответствии с данными табл. 1, но также может быть оценено по формуле (1), где ток  $I_{соср}$  определен для ОПН, установленного на конце линии вместе с междуфазовым ОПН.

Соотношение (1) справедливо также и для определения необходимого числа междуфазовых ОПН, но в этом случае  $I_{соср}$  определяет ток в междуфазовом ОПН, установленном на свободном конце линии.

Конструктивно подвесные ограничители могут быть выполнены в виде колонок варисторов разного диаметра (в зависимости от требуемой их пропускной способности), размещенных в стеклопластиковой трубе. Наружная поверхность трубы покрыта защитным чехлом с ребрами из кремнийорганической резины или другого атмосферо- и трекингоэрозионстойкого материала. Механическая прочность такой конструкции на разрыв обеспечивает как свободную подвеску ОПН, так и использование ограничителя вместо поддерживающей гирлянды изоляторов.

Подвесные фазные ограничители могут подвешиваться под проводом линии с присоединением свободного фланца к опоре линии (рис. 4, а, б). Междуфазовые ограничители отли-

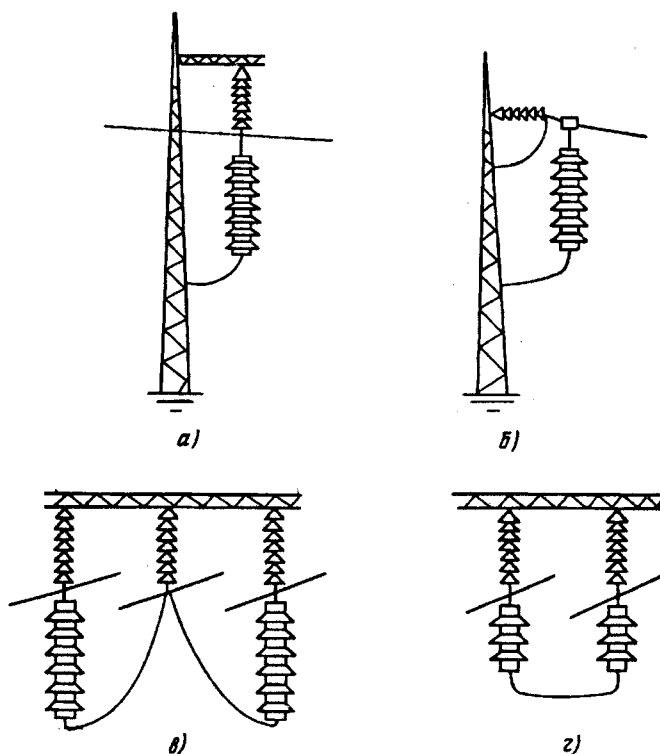


Рис. 4. Схемы подвески фазовых (а, б) и междуфазовых (в, з) ОПН на линии

чаются большей длиной и могут быть подвешены под одним проводом с присоединением нижнего фланца шлейфом ко второму проводу (рис. 4,а), либо они могут состоять из двух разных частей, подвешенных к соседним проводам (рис. 4,з).

Следует подчеркнуть, что минимальная пропускная способность одноколонковых ОПН, предназначенных для установки непосредственно на линии, определяется условием их надежной работы при воздействии грозových перенапряжений [2]. При ударе молнии в провода пролетов линии, примыкающих к опоре, на которой установлены ОПН, их разрушение неизбежно, практически независимо от диаметра варисторов. Однако поскольку длина участка линии между соседними комплектами ОПН составляет 50–100 км вероятность прорыва молнии через тросовую защиту в примыкающих к местам установки ОПН пролетах очень мала. Поэтому можно ожидать одно повреждение ОПН в течение 1000 лет на 100 км линии.

Напряжение набегающих с удаленных участков линии волн грозových перенапряжений ограничено импульсной прочностью линейной изоляции. Кроме того, при распространении вдоль линии волны грозových перенапряжений затухают. По этим причинам увеличение площади варисторов приводит к быстрому уменьшению вероятности повреждения ОПН от набегающих волн.

В качестве критерия для выбора пропускной способности одноколонковых ОПН принята вероятность их поражения набегающими волнами, на порядок меньшая, чем при прорывах молнии на провода в соседних с ОПН пролетах, т.е. одно разрушение в 10000 лет. При такой малой вероятности разрушения ОПН от набегающих волн определяющей является указанная выше вероятность их разрушения от ударов в примыкающие пролеты.

Исходя из этих критериев определена величина требуемого тока пропускной способности при волне тока 8/20 мкс для ограничителей различных классов напряжения [2], которые приведены в табл. 2. В той же таблице приведены необходимые минимальные диаметры варисторов для обеспечения требуемой пропускной способности при грозových импульсах исходя из гарантированной удельной пропускной способности 600–800 А/мм<sup>2</sup> в зависимости от качества варисторов.

Пропускная способность варисторов при коммутационных перенапряжениях значительно ниже. При имитации тока коммутационных перенапряжений импульсом длительностью 2 мс пропускная способность варисторов снижается

примерно в 30 раз по сравнению со случаем воздействия импульсов 8/20 мкс. Исходя из этой оценки в табл. 2 приведены данные о пропускной способности варисторов при импульсах длительностью 2 мс.

Таблица 2

Класс напряжения, кВ	Пропускная способность при импульсе 8/20 мкс, кА	Диаметр варисторов, мм	Пропускная способность при импульсе 2 мс, А
110	2,3	19–22	80
220	4,0	25–30	130
330	7,0	33–38	230
500	9,3	38–44	300
750	14,2	45–52	450
1150	20,0	54–63	650

Применительно к ВЛ 500 кВ обычного исполнения имеем  $I_{\text{соср}} = 1200$  А и  $I_{\text{расп}} = 300$  А. Тогда по формуле (1) при отсутствии междуфазовых ОПН необходимо

$$n = \frac{1,5 \cdot 1200}{300} = 6,$$

распределенных по линии фазовых ОПН.

Для компактной ВЛ 500 кВ при отсутствии и при наличии междуфазовых ОПН согласно табл. 1 расчетный ток  $I_{\text{ф-з.соср}} = 2,0$  кА. Поэтому согласно формуле (1)  $I_{\text{расп}} = 300$  А необходимое число фазовых ОПН

$$n = \frac{1,5 \cdot 1200}{300} \approx 10.$$

Количество междуфазовых ОПН согласно табл. 1 определяется током  $I_{\text{ф-ф.соср}} = 1,3$  кА и при  $I_{\text{расп}} = 300$  А

$$n = \frac{1,5 \cdot 1200}{300} \approx 7.$$

Поскольку таким образом определено количество трехфазных комплектов междуфазовых ОПН, а ограничению подлежат только перенапряжения в соседних фазах, общее количество единичных междуфазовых ОПН  $3n = 21$  может быть распределено на 10 пунктах установки. При этом вследствие транспозиции линии в целом будет обеспечена необходимая симметрия воздействия ОПН на переходные процессы на линиях.

Как фазовые, так и междуфазовые ограничители могут быть выполнены с уровнем ограничения  $K_{\text{огр}} = 1,6$  и выше в зависимости от стойкости варисторов и длительно воздействующего напряжения промышленной частоты.

Установка ограничителей на опорах линии затрудняет контроль токов проводимости ап-



паратов в процессе эксплуатации. Поэтому для таких аппаратов целесообразно применять только нестарящиеся варисторы.

Необходимо специально подчеркнуть, что установка распределенных вдоль линии ОПН обеспечивает и защиту подстанций от набегающих волн грозowych перенапряжений, поскольку согласно вольт-амперной характеристике варисторов (см. рис. 5) при предельных токах грозowych

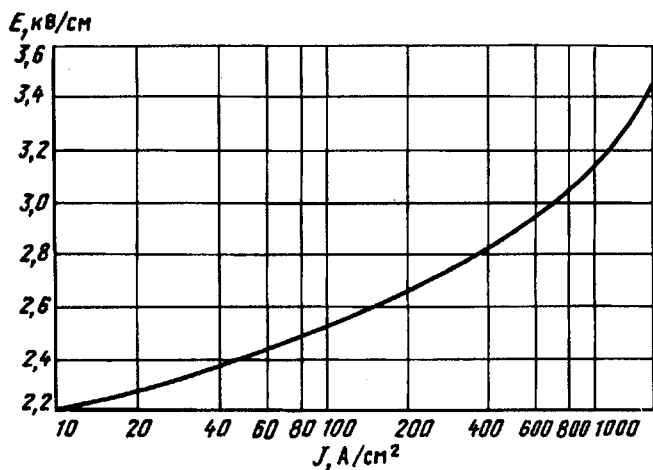


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика варисторов

импульсов, приведенных в табл. 2, напряжение на ОПН в 1,35 раза превосходит напряжение при коммутационных перенапряжениях. Например, при кратности ограничения коммутационных перенапряжений  $K_{огр.к}=1,6$  уровень ограничения грозowych перенапряжений составит  $K_{огр.к}=1,35 \cdot 1,6=2,16$ , что достаточно для надежной защиты изоляции оборудования подстанций.

При этом облегченный вариант одноколонковых ОПН позволяет установить их непосредственно на выводы всех трансформаторов (и реакторов) на подстанциях, что полностью исключает повышение напряжения на изоляции трансформаторов (и реакторов) сверх уровня ограничения ОПН, как это наблюдается при установке ОПН только на шинах подстанции. В связи с изложенным на шинах подстанции установка ОПН обычной конструкции опорного исполнения нецелесообразна.

Интересен опыт эксплуатации одного трехфазного комплекта ОПН 330 кВ в Ленэнерго на линии 220 кВ длиной 29 км, переведенной на напряжение 330 кВ без изменения опор, и следовательно, изоляционных расстояний. Заменили были только изоляторы гирлянд на грязестойкие, чтобы обеспечить необходимую длину пути утечки для номинального напряжения 330 кВ. Поскольку изоляция ВЛ 220 кВ рассчитана на воздействие перенапряжений

$3U_{ф-з}$ , а уровень ограничения установленных ОПН 330 кВ составил  $K_{огр.ф-з}=2$ , были обеспечены нормальные условия работы изоляции линии. За два года эксплуатации этой линии не было отмечено ни одного перекрытия, что подтвердило высокую эффективность подвесных ОПН.

**Приложение.** Упрощенная методика определения необходимой пропускной способности ОПН, установленная на свободном конце линии.

**Случай 1.** Включается фаза 1, другие (2,3) отключены. Идеальный ОПН ( $U_{огр}=\text{const}$ ) установлен между фазой 1 и землей в конце линии с заданным уровнем ограничения перенапряжений относительно земли (не зависящим от тока)  $U_{огр.ф-з}=K_{огр.ф-з} U_{ф-з}$

$$I_{ф-з} = \frac{2U_1 - U_{огр.ф-з}}{z_{11}}, \quad (\text{П-1})$$

где  $U_1$  — амплитуда волны напряжения, набегающей на узел с ОПН.

**Случай 2.** Фазы 1, 2 включаются, фаза 3 отключена. Идеальный ОПН установлен между фазами 1,2 с заданным уровнем ограничения междуфазовых перенапряжений  $U_{огр.ф-ф}=K_{огр.ф-ф} U_{ф-ф}$  (не зависящим от тока):

$$I_{ф-ф} = \frac{U_1 - U_2 - 0,5 U_{огр.ф-ф}}{z_{11} - z_{12}}, \quad (\text{П-2})$$

где  $U_1, U_2$  — амплитуды волн, набегающих по фазам 1, 2;  $z_{11}, z_{12}$  — собственное и взаимное волновые сопротивления фаз симметричной линии;  $z_{11} = \frac{z_{в1} + z_{в0}}{3}$ ;  $z_{12} = \frac{z_{в0} - z_{в1}}{3}$ ;  $z_{в1}, z_{в0}$  — волновое сопротивление прямой и обратной последовательностей.

**Случай 3.** В конце линии однофазное КЗ на фазе 3. Включается фаза 1, фаза 2 отключена. Идеальный ОПН установлен между фазой 1 и землей:

$$I_{ф-з(КЗ)} = \frac{2(U_1 - U_3) - U_{огр.ф-з}}{z_{11}^2 - z_{12}^2} z_{11}, \quad (\text{П-3})$$

где  $U_1, U_3$  — амплитуды волн напряжения, набегающих по фазам 1 и 3.

При выводе формул П-1—П-3 предполагалось, что линия не имеет потерь и двойное время пробега электромагнитных волн до отправного конца больше, чем время достижения максимума тока в ОПН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Изоляция электрических сетей. — Л.: Энергия, 1979. — 204 с.
2. Ограничение коммутационных и грозowych перенапряжений

жений одноколновыми нелинейными ограничителями перенапряжений/Г.Н.Александров, И.М.Богатенков, Г.А.Гусейнов и др. — Электротехника, 1986, № 9. с. 2—6.

3. Оптимизация конструкции нелинейных ограничителей перенапряжений для работы в районах с повышенным загрязнением атмосферы/Г.Н.Александров, В.Е. Кизеветтер, В.Ф.Рыбаков и др. — Электротехника, 1988, № 3.

4. Эффективность применения варианта ВЛ повышенной натуральной мощности для присоединения Богучанской ГЭС к энергосистеме/Г.Н.Александров, В.И.Гельфандт, Э.А.Диаконский и др. — Энергетическое строительство, 1990, № 1, с. 32—35.

[18.02.93]

**А в т о р ы :** Александров Георгий Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ)

в 1953 г. В 1968 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Коронный разряд на линиях электропередачи» во Всесоюзном электротехническом институте. В 1991 г. был избран членом-корреспондентом РАН. Зав. кафедрой электрических аппаратов Санкт-Петербургского государственного технического университета (СПГТУ).

**Евдокунин Георгий Анатольевич** окончил электромеханический факультет ЛПИ. В 1989 г. в ЛПИ защитил докторскую диссертацию по теме «Электромагнитные переходные процессы в линиях повышенной натуральной мощности». Профессор кафедры электрических систем СПбГТУ.

## Расчет магнитного поля магнитоэлектрического вентильного двигателя методом сопряжения конформных отображений

АФАНАСЬЕВ А.А., ВОРОБЬЕВ А.Н.

*Предложен метод, позволяющий анализировать распределение магнитного поля в воздушном зазоре и сердечниках. Обобщается понятие скалярного магнитного потенциала обмотки; рассматривается расчет сил и моментов; оценивается влияние объемных зарядов пазов на магнитное поле в воздушном зазоре.*

*The method for analysis of the magnetic field distribution in an air gap and in cores is proposed. The conception of the scalar magnetic potential of a winding is defined more precise. The calculation of forces and moments is discussed. The influence of space magnetic charges of slots on the magnetic field in a gap is evaluated.*

Вентильные двигатели (ВД) с высококоэффициентными постоянными магнитами, расположенными на ярме ротора в виде сравнительно тонкого магнитного слоя, находят широкое применение в электроприводах различных механизмов, прежде всего станков и робототехнических комплексов.

Для обоснованного выбора расхода (толщины) магнитного сплава, допустимого тока кратковременной перегрузки ВД (по условиям отсутствия необратимого размагничивания магнитов), оценки уровня насыщения отдельных элементов магнитных сердечников, характера пульсаций электромагнитного момента необходим уточненный расчет магнитного поля ВД на интервале пространственного периода.

Системы с постоянными магнитами могут рассчитываться с помощью метода Фурье [1,2], интегральных уравнений [3,4], конечных элементов [2,5]. В статье используется новый метод расчета плоскопараллельных магнитных полей (МП) в нелинейных средах, основанный, во-первых, на разбиении исходной области с МП на совокупность кусочно-однородных элементарных областей канонической формы, во-вторых, на конформном отображении верхней полуплоскости на указанные элементарные области, в-третьих, на использовании интеграла Шварца для комплексной потенциальной функции верхней полуплоскости [6], в-четвертых, на деформации магнитно-анизотропного пространства с целью приведения его к изотропному [7].

**Принципиальные особенности метода.** Предположим, что для плоской области, содержащей магнитно-неоднородную среду, известны источники потенциального МП<sup>1)</sup> — это заданное распределение внутри ее и на границе скалярного магнитного потенциала (СМП) и магнитных зарядов. Выделим в области однородные участки, магнитные проницаемости которых неизменны (например, участки воздушные и участки, занятые немагнитными проводниками с током). Остаточную часть области с магнитно-нелинейной средой разобьем на элементарные участки (ЭУ) треугольной или четырехугольной формы, в пределах которых полагаем магнитную проницаемость и остаточную намагниченность среды одинаковыми. Прямолинейные границы ЭУ разделим на  $N$  равных интервалов, СМП которых аппроксимируем линейными или кусочно-постоянными зависимостями.

Конформное преобразование  $i$ -го ЭУ, расположенного в комплексной области  $Z$ , на верхнюю комплексную полуплоскость реализуется дифференциальным уравнением Кристоффеля—Шварца [6]:

$$\frac{dZ}{dt} = {}^i\lambda(t). \quad (1)$$

Для верхней комплексной полуплоскости согласно задаче Дирихле существует комплексная потенциальная функция (КПФ)

$$W(t) = V(t) + jU(t), \quad (2)$$

мнимая часть которой  $U(t)$ , являясь СМП, принимает на вещественной оси  $\xi$  заданное значение  $U(\xi)$ . Комплексная потенциальная функция верхней полуплоскости, отображающей  $i$ -й ЭУ, выражается через СМП границы  ${}^iU(\xi)$  в виде интеграла Шварца [6]:

$${}^iW(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} {}^iU(\xi) \left[ \frac{1}{\xi-t} + C(\xi) \right] d\xi. \quad (3)$$

Для произвольной точки наблюдения  $t=p+jq$  верхней полуплоскости осевые составляющие вектора напряженности потенциального МП в соответствии с условиями Коши—Римана равны:

$$H_{\xi} = -\frac{\partial U}{\partial p} = \frac{\partial V}{\partial q}; \quad H_{\eta} = -\frac{\partial U}{\partial q} = \frac{\partial V}{\partial p}. \quad (4)$$

Из формул (1)—(4) получим для нормальной составляющей напряженности МП на границе  $i$ -го ЭУ в плоскости  $Z$ :

$${}^iH_n = -\frac{\partial V}{\partial p} \frac{dp}{dZ} = -\frac{1}{\pi |{}^i\lambda(p)|} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{{}^iU(\xi) d\xi}{(\xi-p)^2}. \quad (5)$$

При положительном (отрицательном) знаке  ${}^iH_n$  МП направлено внутрь (наружу)  $i$ -го ЭУ в граничной точке  $Z_p$ , являющейся образом точки  $p$  на вещественной оси  $\xi$  плоскости  $t$ .

При кусочно-постоянной или кусочно-линейной аппроксимации функции  ${}^iU(\xi)$  интеграл в формуле (5) находится аналитически. В частности, для первого вида аппроксимации имеем:

$${}^iH_{nj} = \frac{-1}{\pi |{}^i\lambda(\tilde{p}_j)|} \sum_{k=1}^N {}^iU_k \left( \frac{1}{p_k - \tilde{p}_j} - \frac{1}{p_{k+1} - \tilde{p}_j} \right), \quad (6)$$

где точка  $\tilde{p}_j$  расположена внутри  $j$ -го интервала границы ЭУ. Для тангенциальной составляющей напряженности МП в этом случае справедливо:

$${}^iH_{tj} = ({}^iU_{2m} - {}^iU_{2m-1}) / {}^i l_j, \quad (7)$$

где  $m = [(j+n-1)/n]$  — целая часть числа;  $n = N/4(3)$  — число счетных точек одной стороны четырехугольного (треугольного) ЭУ;  ${}^i l_j$  — расстояние между  $j$ -й и  $(j+1)$ -й счетными точками одной стороны границы  $i$ -го ЭУ.

Формулы (6), (7) устанавливают связь напряженности МП со СМП в граничных точках ЭУ. Выражение (3) справедливо, если КПФ  $W(t)$  рассматривается как аналитическая функция и, следовательно, удовлетворяет дифференциальному уравнению Лапласа. Однако, как легко показать, для среды с магнитной анизотропией КПФ не является решением уравнения Лапласа. Действительно, из уравнения

$$\operatorname{div} \mu_0 (\bar{M} + \bar{H}) = 0, \quad (8)$$

приняв направление оси  $y$  совпадающим с направлением текстуры магнитного материала (с направлением оси легкого намагничивания  $\alpha$ ), получим:

$$\frac{\partial^2 U}{(\partial x')^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu_{\alpha}} \left( \operatorname{div} \bar{M}_0 + H_x \frac{\partial \mu_{\alpha}}{\partial x} + H_y \frac{\partial \mu_{\alpha}}{\partial y} \right), \quad (9)$$

где  $x' = x k_{\Delta}$ ;  $k_{\Delta} = \sqrt{\mu_{r\alpha} / \mu_{r\beta}}$ ;  $\mu_{r\alpha}(\beta) = 1 + \chi_{\alpha}(\beta)$ ;  $\chi_{\alpha}(\beta)$  — магнитная восприимчивость в направлении оси  $\alpha(\beta)$ .

Из анализа видно, что внутри ЭУ, где правая часть уравнения (9) обращается в нуль, скалярное МП описывается уравнением Лапласа, если расчетная координата  $x'$  выбирается в  $k_{\Delta}$  раз больше физической координаты  $x$ . Следовательно, ЭУ с анизотропной магнитной средой должны вначале претерпеть деформацию по одной из ко-

1) Порядок сведения вихревых зон МП к потенциальным считается известным [8, 9].

ординат, а только потом конформно преобразовываться в верхнюю полуплоскость. Такие деформированные открытые (граница не входит в состав участка) ЭУ, для которых справедливо уравнение Лапласа, могут считаться заполненными изотропной средой, т.е. рассмотренная деформация участков обеспечивает приведение их анизотропной среды к изотропной. Для преобразованной изотропной области с  $\mu_r = \mu_{ra}$  становится возможным применение формул (3)–(6).

Физическое сопряжение исходного ЭУ (в плоскости  $Z$  по СМП и нормальным составляющим индукции) с соседними ЭУ производится после пересчета магнитной напряженности по оси  $x$  с промежуточного значения (деформированного, как и сам ЭУ)  $H_x$  на физическое значение  $H_x$  в соответствии с равенствами:

$$H_x = -\frac{\partial U}{\partial x} = -k_\Delta \frac{\partial U}{\partial x'} = k_\Delta H'_x. \quad (10)$$

Конформные преобразования необходимы, вообще говоря, только для использования сравнительно простых формул (5), (6), связывающих нормальные составляющие напряженности МП со СМП в счетных точках плоскости  $Z$ .

Применительно к деформированным ЭУ произвольной четырехугольной формы (рис. 1)

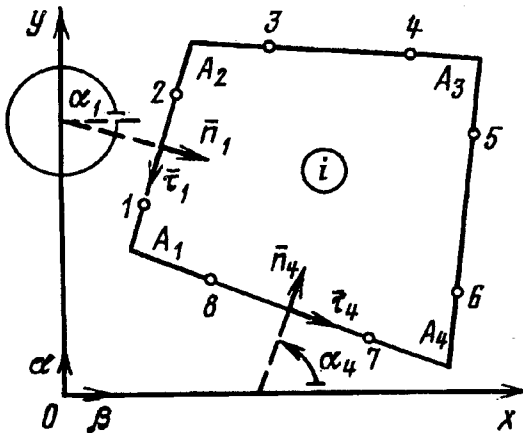


Рис. 1. Ориентация сторон четырехугольного элементарного участка

уравнения (6), (7) можно записать в векторно-матричном виде:

$${}^i\bar{H}'_n = [{}^ig] {}^i\bar{U}; \quad {}^i\bar{H}'_t = [{}^ih] {}^i\bar{U}, \quad (11)$$

где выражения для квадратных матриц  $[{}^ig]$  и  $[{}^ih]$  при  $N=8$  приведены в приложении 1.

Из рис. 1 и формул (10), (11) следует:

$${}^i\bar{H}_x = {}^ik_\Delta \{ [{}^iC'] [{}^ig] + [{}^iS'] [{}^ih] \} {}^i\bar{U}; \quad (12)$$

$${}^i\bar{H}_y = \{ [{}^iS'] [{}^ig] - [{}^iC'] [{}^ih] \} {}^i\bar{U}; \quad (13)$$

$${}^i\bar{B}_n = \mu_0 \{ [{}^iC'] \bar{M}_{0x} + [{}^iS'] \bar{M}_{0y} + [{}^ir] {}^i\bar{U} \}, \quad (14)$$

где

$$[{}^ir] = {}^i\mu_{r\beta} {}^ik_\Delta [{}^iC'] \{ [{}^iC'] [{}^ig] + [{}^iS'] [{}^ih] \} + {}^i\mu_{ra} [{}^iS'] \{ [{}^iS'] [{}^ig] - [{}^iC'] [{}^ih] \}; \quad (15)$$

выражения для квадратичных матриц  $[{}^is]$ ;  $[{}^is']$ ;  $[{}^iC]$ ;  $[{}^ic']$  приведены в приложении 2.

Установим общую сквозную нумерацию СМП для всей расчетной области<sup>2)</sup>:  ${}^iU_j = U_s$  ( $S=1, 2, \dots, Q$ ). Для общих точек  $q$  ( $q \in S$ ) границ двух соседних ЭУ с номерами  $i$  и  $k$  справедливо:

$${}^iB_{nq} = {}^kB_{nq}. \quad (16)$$

Распространяя равенство (16) на все множество  $S$ , получим систему линейных алгебраических уравнений относительно вектора  $\bar{U} = [U_1 U_2 \dots U_Q]^T$ , имеющую вид:

$$[A] \bar{U} = \bar{F}, \quad (17)$$

где  $[A]$  — квадратичная матрица размером  $Q$ ; ненулевые элементы матрицы-столбца  $\bar{F}$  представлены составляющими начального (остаточного) намагничивания и заданными СМП (или значениями их скачка) в расчетных точках границ соседних ЭУ.

Расчет магнитного поля и электромагнитного момента вентильного двигателя типа ДВМ 115 [11]. Трехфазный шестиполусный ВД имеет на статоре 27 полузакрытых пазов, самарий-кобальтовые постоянные магниты, закрепленные на 18-гранной поверхности ярма ротора. Поскольку обмотка якоря ВД имеет  $q=3/2$ , то пространственный период изменения МП равняется двум полюсным делениям (МП не обладает симметрией третьего рода).

На рис. 2 показана расчетная область поперечного сечения ВД<sup>3)</sup>, разбитая на 92 ЭУ, из которых 91 имеет форму четырехугольника, а один (воздушный зазор) представляет часть кругового кольца с центральным углом в  $120^\circ$ . Ядро статора разбито на 18, зубцы — на 27, пазы — на 18, ярмо ротора — на 14, магниты — на 14

2) Общее число счетных (геометрических) точек в общем случае меньше  $Q$ , так как в ряде точек, через которые проходят магнитные листы, СМП будет испытывать скачок. В этих точках имеем два значения СМП: один — на прямой, другой — на обратной стороне магнитного листа.

3) Из расчетной области исключены поперечное сечение вала и ступица с шестью ребрами.

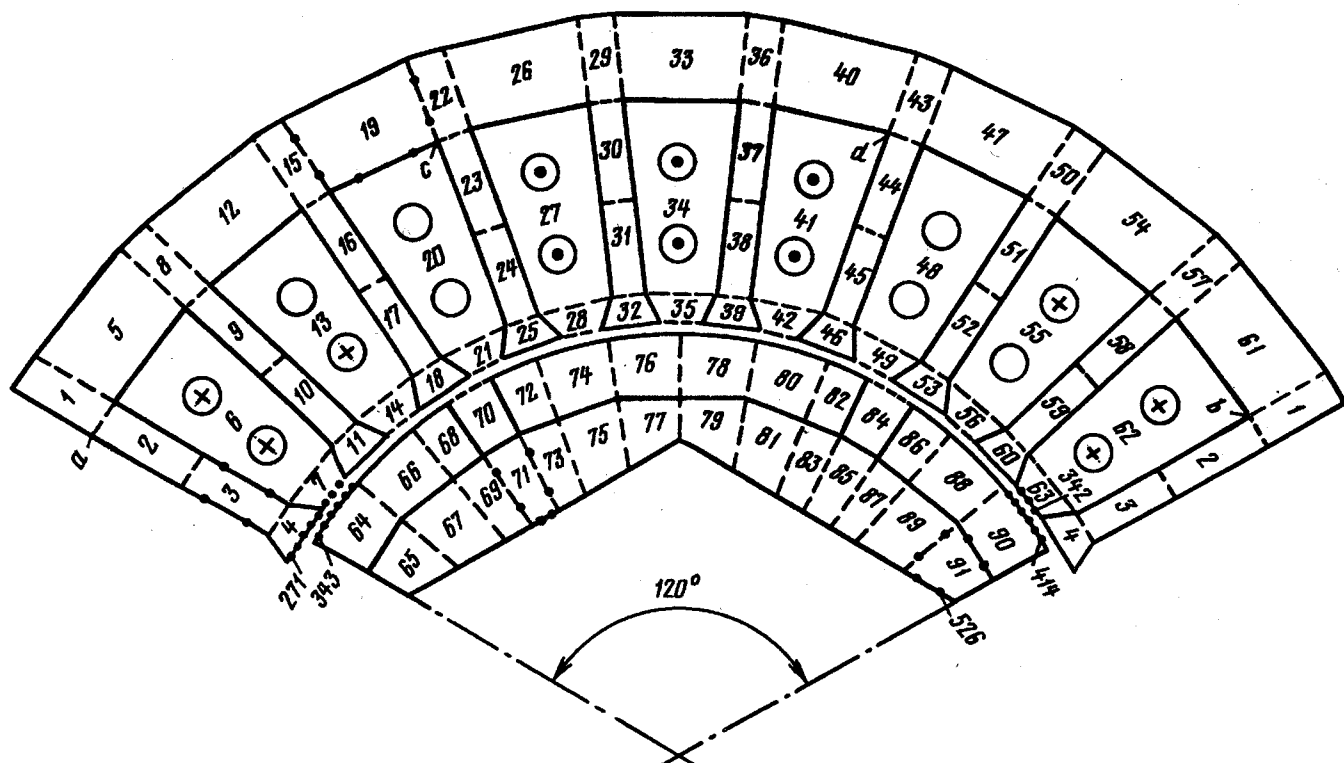


Рис. 2. Расчетная область поперечного сечения двигателя (ЭУ 64, 66, 68, 86, 88, 90 — магниты двух северных полюсов; ЭУ 72, 74, 76, 78, 80, 82 — магниты южного полюса)

ЭУ. Часть кольцевой области воздушного зазора, относящаяся к паре полюсов, преобразуется сначала логарифмической функцией в прямоугольник, который затем отображается на верхнюю полуплоскость посредством дифференциального уравнения Кристоффеля—Шварца.

Каждая сторона четырехугольника содержит две расчетные точки, за исключением сторон, примыкающих к воздушному зазору. Там стороны на краю зубцов и пазов статора содержат соответственно пять и три счетные точки, а стороны ЭУ на краю магнитов содержат по шесть (большие ЭУ) или по четыре (малые ЭУ) счетные точки (рис. 2).

Общее число геометрических счетных точек в расчетной области на рис. 2 составляет 526, причем СМП одной из них (в данном случае 526-й) принимается равным нулю. Магнитные листы, как отмечается ниже, выбраны проходящими через 34 счетные точки (в них СМП испытывает скачок), поэтому размерность системы линейных алгебраических уравнений (17) будет равна числу  $Q=525+34=559$ .

Аппроксимация распределения СМП на сторонах ЭУ — кусочно-ступенчатая.

В табл. 1 представлены некоторые показатели МП при обесточенной обмотке статора для пяти выборочных ЭУ, относящихся (см. рис. 2) к ярму ( $i=19$ ) и зубцу ( $i=2, 3, 4$ ) статора и ярму

ротора ( $i=71$ ), со счетными точками с номерами  $j^*$ .

Расчеты показывают, что наиболее насыщенными ЭУ являются: у зубцов — 2-й ( ${}^2\mu_r=639,9$ ;  ${}^2B_8=2,047$  Тл), у ярма статора — 19-й и 47-й ( ${}^{19}\mu_r={}^{47}\mu_r=1992$ ;  ${}^{19}B_6={}^{47}B_1=1,605$  Тл), у ярма ротора — 71-й и 85-й ( ${}^{71}\mu_r=2010$ ;  ${}^{85}\mu_r=2011$ ;  ${}^{71}B_2=1,432$  Тл;  ${}^{85}B_2=1,435$  Тл).

Таблица 1

Номер элементарного участка $i$	Номер счетной точки $j$	Показатель магнитного поля при обесточенной обмотке статора			
		${}^iU_j$ , А	${}^iH_{nj}$ , А/м	${}^iB_{nj}$ , Тл	${}^i\mu_r$ , отн.ед.
2	1	19,501	-0,93619	-0,00075	639,9
	2	10,489	-1,3335	-0,00107	
	3	5,9905	-2534,9	-2,0418	
	4	5,9906	-2535,0	-2,0418	
	5	10,489	-1,3337	-0,00107	
	6	19,501	-0,93610	-0,00075	
	7	24,011	2541,8	2,0473	
	8	24,011	2541,8	2,0473	
3	1	37,452	14,437	0,01170	644,0
	2	28,493	0,51045	0,00041	
	3	24,011	-2525,4	-2,0473	
	4	24,011	-2525,4	-2,0473	
	5	28,493	0,51046	0,00041	
	6	37,452	14,437	0,01170	
	7	41,853	2480,4	2,0108	
	8	41,853	2480,4	2,0108	

\* Счетные точки ЭУ нумеруются в порядке их обхода по часовой стрелке. Номер один имеет точка в левом нижнем углу.

## Окончание таблицы 1

Номер элементарного участка $i$	Номер счетной точки $j$	Показатель магнитного поля при обесточенной обмотке статора			
		$i U_j$ , А	$i H_{nj}$ , А/м	$i B_{nj}$ , Тл	$i \mu_r$ , отн.ед.
4	1	43,351	132,5	0,2941	1767,0
	2	42,553	22,33	0,04958	
	3	41,853	-905,5	-2,011	
	4	41,853	-905,5	-2,011	
	5	42,553	22,33	0,04958	
	6	43,351	132,5	0,2941	
	7	43,492	428,4	0,9513	
	8	43,219	352,8	0,7833	
	9	43,121	344,7	0,7655	
	10	43,229	352,8	0,7833	
	11	43,492	428,4	0,9513	
19	1	-0,79995	602,27	1,5078	1992,0
	2	-0,87512	477,76	1,1961	
	3	-1,9476	0	0	
	4	-4,4189	0	0	
	5	-5,4269	-438,41	-1,0975	
	6	-5,6805	-640,79	-1,6042	
	7	-4,3487	-0,70492	-0,00176	
	8	-2,0794	0,08896	0,00022	
71	1	1,4301	-473,87	-1,1971	2010,0
	2	1,2173	-566,91	-1,4322	
	3	1,5275	-41,414	-0,10462	
	4	2,3866	38,951	0,09840	
	5	2,7007	568,06	1,4350	
	6	2,4877	473,87	1,1971	
	7	2,2146	0	0	
	8	1,7032	0	0	

Рис. 3 показывает распределение нормальной составляющей индукции на противоположных сторонах воздушного зазора — толстая кривая соответствует цилиндрической поверхности ротора, тонкая — поверхности статорного сердечника. Видим, что для статора пульсации индукции, обусловленные зубчатой структурой воздушного зазора, выражены значительно сильнее — возрастают глубина и число пульсаций. Последнее обстоятельство связано с неравномерным распреде-

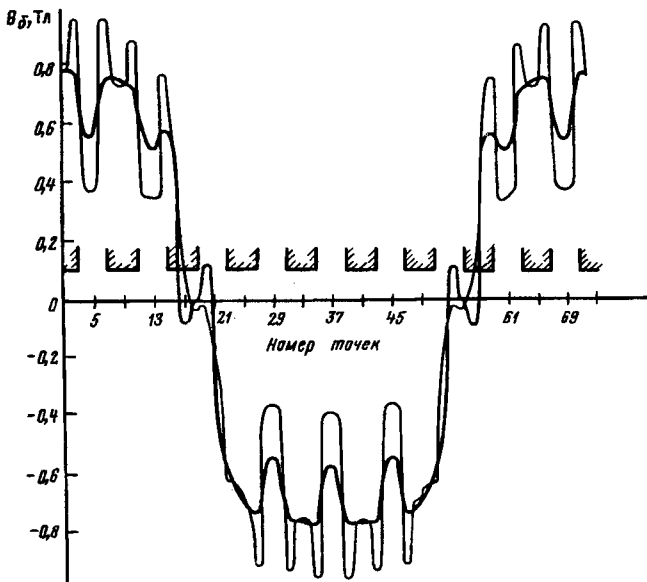


Рис. 3. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре обесточенного двигателя: — на поверхности магнитов; — на окружности расточки статора

лением индукции на поверхности коронки зубца — на краях этой поверхности наблюдается увеличение интенсивности МП.

Характер магнитного насыщения ЭУ всех девяти зубцов был следующим:

$i$	2	9	16	23	30	37	44	51	58
$i \mu_r$ , отн.ед.	639,9	702,6	2488	1141	657,5	657,5	1141	2488	702,6

Рассматриваемый метод оперирует с показателями МП на границах ЭУ. Эта особенность позволяет естественным образом использовать метод натяжений [12] при расчете силовых взаимодействий между элементами ВД.

Вектор натяжений, равный силе, действующей на единичную площадку в произвольной точке границы  $s$  некоторого замкнутого пространства, на которое МП оказывает силовое воздействие, равен:

$$\bar{T}_n = \bar{T}_{nn} + \bar{T}_{nt}, \quad (18)$$

где

$$\bar{T}_{nn} = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_r \mu_0} \bar{n}; \quad (19)$$

$$\bar{T}_{nt} = \frac{B_n B_t}{\mu_r \mu_0} \bar{\tau} = B_n H_t \bar{\tau}; \quad (20)$$

$\bar{n}, \bar{\tau}$  — единичные орты нормального и тангенциального направления в рассматриваемой точке границы ( $\bar{n}$  совпадает с внешней нормалью области,  $\bar{\tau}$  опережает  $\bar{n}$ );  $B_n, B_t$  — нормальная и тангенциальная составляющие индукции в граничной точке области.

Сила, действующая на выделенную область пространства с границей  $s$ , будет равна

$$\bar{F} = \oint \bar{T}_n ds. \quad (21)$$

Если через  $\bar{r}$  обозначить радиус-вектор элементарной площадки  $ds$  относительно оси вращения, то для момента относительно этой оси имеем выражение

$$m = \oint [\bar{r} \bar{T}_n] ds. \quad (22)$$

Применяя формулы (18)–(22) применительно к рис. 2 (на котором в качестве следа поверхности  $s$  возьмем окружность воздушного зазора, примыкающую к поверхности ротора), получим для электромагнитного момента ВД:

$$M = r \oint T_{nt} ds \approx pl_\delta b R_p \sum_{j=343}^{414} B_{nj} H_{tj}, \quad (23)$$

где  $p$  — число пар полюсов;  $\delta$  — расчетная длина сердечников ВД;  $b$  — шаг счетных точек на поверхности ротора;  $r=R_p$  — радиус наружной поверхности ротора.

Запишем формулу (23) в более общем виде, принимая во внимание, что  $b=\frac{\pi d_p}{pN_p}$ , где  $D_p=2R_p$ ;  $N_p$  — число счетных точек на паре полюсов поверхности ротора.

С учетом приведенного получаем:

$$M=\frac{\pi}{2} \frac{l_{\delta} D_p^2}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} B_{nj} H_{\tau j}=\frac{\pi}{2} l_{\delta} D_p^2 (B_n H_{\tau})_{\text{ср}}. \quad (24)$$

Структура формулы (24) показывает, что среднее значение произведения в скобках есть средняя удельная касательная сила [13], приходящаяся на единицу площади цилиндрической поверхности ротора:

$$F_K = (B_n H_{\tau})_{\text{ср}}. \quad (25)$$

По формуле (23) находится электромагнитный момент ВД при обесточенной обмотке якоря (момент реактивного происхождения, обусловленный зубчатой структурой воздушного зазора) для шестнадцати положений ротора, задаваемых последовательными его поворотами (против часовой стрелки) на  $1/16$  зубцового шага статора  $t_z$ . Начальное положение ротора показано на рис. 2.

Максимальное значение момента составило  $0,308 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (6,55% номинального момента ВД), период его изменения — половина шага  $t_z$  (имеем два устойчивых положения ротора на угловом интервале, соответствующем шагу  $t_z$ ).

График изменения реактивного момента при повороте ротора на зубцовый шаг статора показан на рис. 4. Видно, что кривая  $M=M(v)$  близка

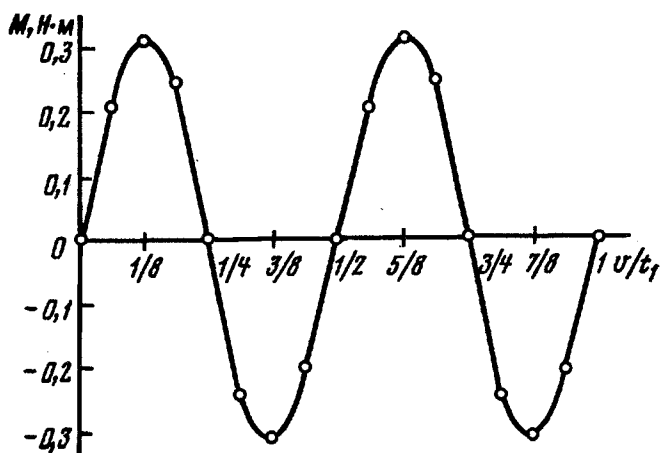


Рис. 4. Реактивный момент обесточенного двигателя

к синусоиде, поэтому реактивный момент можно существенно снизить, например, путем выполнения ротора составным, состоящим из двух половин, сдвинутых в тангенциальном направлении на угол, близкий к  $t_z/4$  [16].

При расчете МП и электромагнитного момента ВД с током в обмотке якоря вихревые МП внутри пазов заменяются суммой потенциальных и дополнительных МП [8, 9].

Дополнительное МП, определяемое интегралом

$$H_0 = H_{0x} = \int_{y_n}^y \Delta dy, \quad (26)$$

где  $\Delta=I_n/b_{\text{ср}}h$  — средняя плотность тока полузакрытого паза трапецеидальной формы (рис. 5);

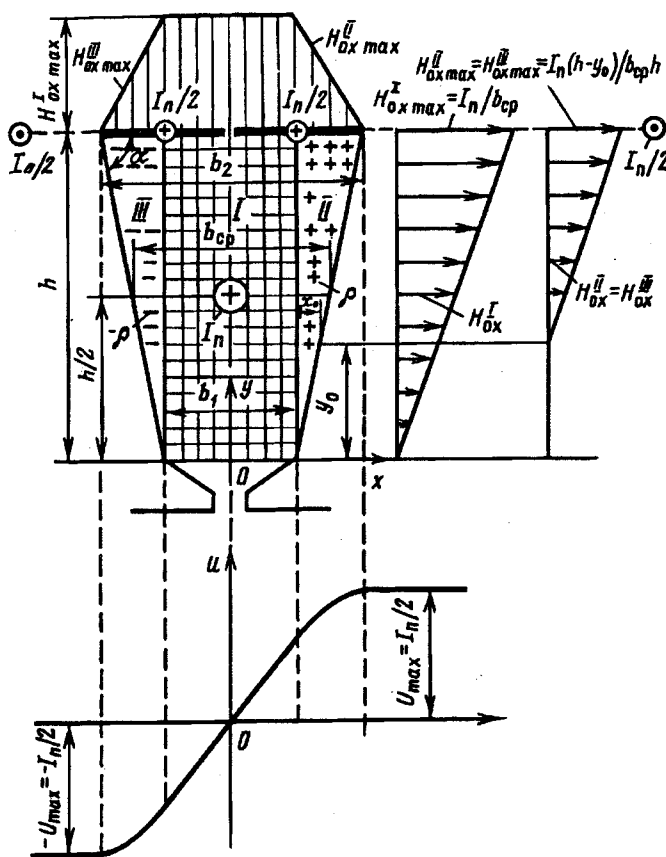


Рис. 5. К расчету потенциального и дополнительного магнитных полей, вызванных током полузакрытого паза  $I_n$

$I_n$  — ток паза будет иметь компоненту только по оси  $x$ , если линия интегрирования в (26) — прямая, параллельная оси  $y$ .

Полузакрытый паз может быть подразделен на три зоны. В зоне I (рис. 5;  $|x| \leq b_1/2$ ,  $0 \leq y \leq h$ ,  $y_n=0$ ) дополнительное МП ( $H_{0x}^I$ ) нарастает линейно от нуля у края клина ( $y=0$ ) до максимального значения на дне паза:

$$H_{0x\max}^I = I_{\Pi}/b_{\text{ср}}. \quad (27)$$

В зонах II и III, располагаемых соответственно справа и слева от зоны I ( $b_1/2 < |x| \leq b_2/2$ ;  $y_0 \leq y \leq h$ ) дополнительное МП будет линейно нарастать от нуля у стенки паза (от точки с координатами  $x_0; y_0$ ) до максимального значения на дне паза, равного

$$H_{0x\max}^{\text{II}} = H_{0x\max}^{\text{III}} = I_{\Pi}(h - y_0)/b_{\text{ср}}h = I_{\Pi}[h - (|x| - b_1/2) \operatorname{tg} \alpha / b_{\text{ср}}h], \quad (28)$$

где  $\alpha$  — угол между дном и стенкой паза (рис. 5).

График изменения  $H_{0x\max}$  на дне паза показан на рис. 5. Для обеспечения скачкообразного уменьшения дополнительного МП до нуля на дне паза (и локализация тем самым этого МП пространством, занятым проводниками в пазах) необходимо разместить на дне бесконечно тонкий слой тока  $I_{\Pi}$  с линейной плотностью  $H_{0x\max}$  [имеем токи (+)  $I_{\Pi}/2$ , «размазанные» на левой и правой половинах дна паза; обратные провода с токами (-)  $I_{\Pi}/2$  располагаем слева и справа от паза вне расчетной области (рис. 5,6)].

Скалярный магнитный потенциал (СМП) токового слоя на дне паза будет иметь максимальное отрицательное значение при  $x \leq -b_2/2$ , равное  $U = -U_{\max} = -I_{\Pi}/2$  (проходить через нуль при  $x=0$ ),

и будет равным (+)  $U_{\max} = I_{\Pi}/2$  при  $x \geq b_2/2$  в соответствии с равенством

$$U(x) = -\frac{I_{\Pi}}{2} + \int_{-b_2/2}^x H_{0x\max} dx. \quad (29)$$

Очевидно на интервалах, относящихся к зонам II, III паза ( $b_1/2 \leq |x| < b_2/2$ ), изменение функции  $U(x)$  будет отлично от линейного. Из формул (27)–(29) имеем для зон I, II и III, соответственно, выражения:

$$U(x) = -\frac{I_{\Pi}}{2} \frac{b_1}{b_{\text{ср}}} + \frac{I_{\Pi}}{b_{\text{ср}}} \left( x + \frac{b_1}{2} \right); \quad (30)$$

$$U(x) = \frac{I_{\Pi}}{2} \frac{b_1}{b_{\text{ср}}} + \frac{I_{\Pi}}{b_{\text{ср}}} \left( x - \frac{b_1}{2} \right) \left[ 1 - \left( x - \frac{b_1}{2} \right) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2h} \right]; \quad (31)$$

$$U(x) = -\frac{I_{\Pi}}{2} + \frac{I_{\Pi}}{b_{\text{ср}}} \left( x + \frac{b_2}{2} \right) \left[ 1 + \left( x + \frac{b_2}{2} \right) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2h} \right]. \quad (32)$$

Графики изменения СМП на дне пазов изображены на рис. 6.

Токовые слои на дне пазов и их обратные провода образуют магнитные листы, расположение других частей которых выбирается по соображениям удобства расчета МП. Будем считать положение этих листов совпадающим со смежными границами соседних ярмовых и пазовозубцовых ЭУ, проходящих по линии  $a, c, d$  (рис 2).

В этом случае уменьшается число счетных точек, СМП которых испытывает скачок, равный  $U(x)$ , по сравнению с вариантом, содержащим магнитные листы, огибающие зубцы и выходящие в воздушный зазор.

При суммировании СМП  $U_j(x)$  ( $j=1, 2, \dots, 9$ ) всех пазовых магнитных листов получим результирующую зависи-

$$\text{мость} \quad U_{\Sigma}(x) = \sum_{j=1}^9 U_j(x)$$

(рис. 6), которая отличается от классической МДС, во-первых местом действия (МДС обычно привязывают к положению окружностей воздушного зазора [14]), во-вторых, интервалом изменения (ширина дна

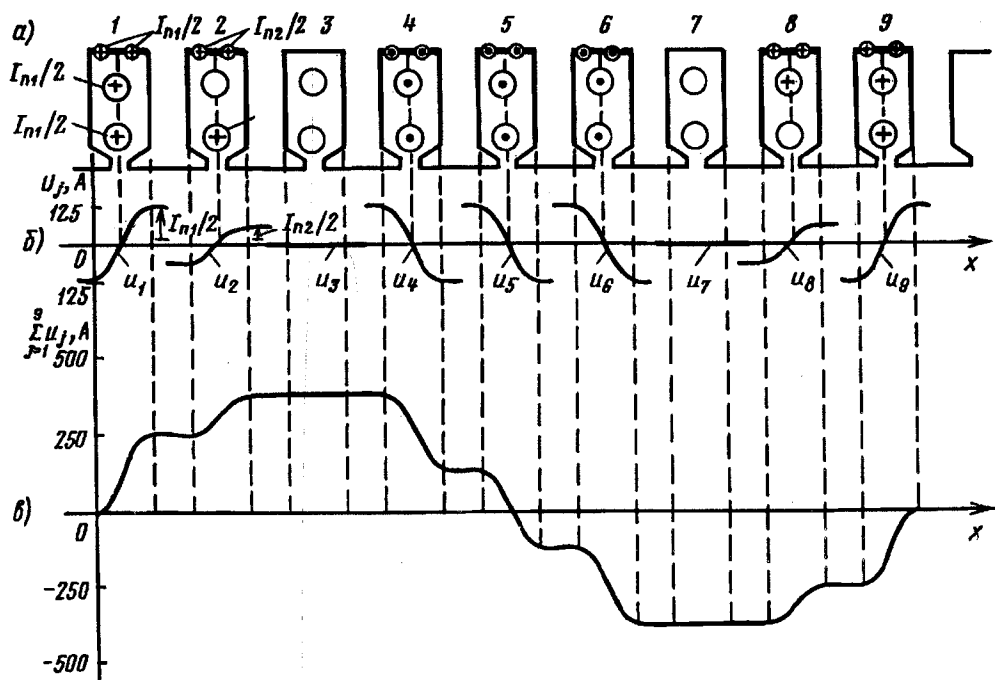


Рис. 6. К расчету источников потенциального магнитного поля, вызванного током обмотки статора: а — токовые слои на дне пазов, локализирующие дополнительные магнитные поля в пространстве пазов; б — скалярные магнитные потенциалы  $U_j$  ( $j=1, 2, \dots, 9$ ) пазовых магнитных листов, располагаемых на окружности, проходящей через днища пазов статора; в — суммарный скалярный магнитный потенциал всех пазовых магнитных листов



паза вместо ширины открытия паза у МДС), в-третьих, характером изменения — в общем случае нелинейным (линейное изменение имеем только для открытых пазов, у МДС изменение принимается линейным или скачкообразным [13, 15]).

При полузакрытых пазах имеется еще один источник потенциального МП [10] — магнитные заряды в областях II и III (рис. 5), которые для пазов с прямолинейной поперечной геометрией имеют постоянную объемную плотность:

$$\rho_M^{II(III)} = -\mu_0 \operatorname{div} \bar{H}_0 = -\mu_0 \frac{\partial H_{0x}}{\partial x} = (\pm) \mu_0 \frac{I_n \operatorname{tg} \alpha}{hb_{cp}}. \quad (33)$$

Эти заряды при открытых пазах ( $\alpha = \pi/2$ ) располагаются на параллельных стенках с поверхностной плотностью:

$$\sigma_M^{II(III)} = -\mu_0 \operatorname{Div} \bar{H}_0 = (\pm) \mu_0 (H_{0x1} - H_{0x2}) = (\pm) \mu_0 H_{0x}. \quad (34)$$

Объемные заряды наводят на границах ЭУ, внутри которых они расположены, дополнительный СМП:

$$\Delta U(p) = \frac{1}{2\pi\mu_0} \int_s \rho_M(q) \ln r_{pq}^{-1} ds, \quad (35)$$

где  $p, q$  — точки наблюдения и текущие соответственно.

Интеграл (35) может быть заменен суммой [8]:

$$\Delta U(\tilde{p}_j) = \frac{\rho_M}{2\pi\mu_0} \sum_i \ln r_{\tilde{p}_j i}^{-1} \Delta S_i + \frac{\rho_M R^2}{2\mu_0} \left( \frac{1}{2} - \ln r \right), \quad (36)$$

где  $R$  — радиус достаточно малого круга с центром в точке наблюдения  $\tilde{p}_j$ .

Таблица 2

Номер счетной точки $j$	Значение СМП	
	вычисленное по формуле (36)	результатирующее
12	5,133	124,0
1	16,37	38,87
2	32,58	29,87
3	46,38	20,84
4	47,85	11,79
5	14,84	35,04
6	-14,84	223,7
7	-47,85	255,3
8	-46,38	259,2
9	-32,58	263,4
10	-16,37	267,9
11	-5,133	260,8

В табл. 2 приведены значения СМП в счетных точках  $j$  (рис. 2) ЭУ с номером  $i=6$  (первый паз слева на рис. 2), рассчитанные по формуле (36) для полного номинального тока паза

( $I_n = 248,4$  А), и результирующие значения СМП в тех же точках, вызванного магнитными листами, намагниченностью магнитов и объемными магнитными зарядами.

Эксперименты показывают, что максимальная погрешность расчета магнитной индукции на наружной поверхности магнитов при неучете объемных магнитных зарядов в пазах составляет 0,11%.

Поверхностные магнитные заряды при расчете МП реализуются как скачок известного дополнительного поля паза  $H_{0x}$  до нуля на параллельных стенках пазов, при котором, однако, нормальная составляющая магнитной индукции результирующего МП сохраняет непрерывность.

На рис. 7 показаны расчетные кривые распределения нормальной составляющей магнитной

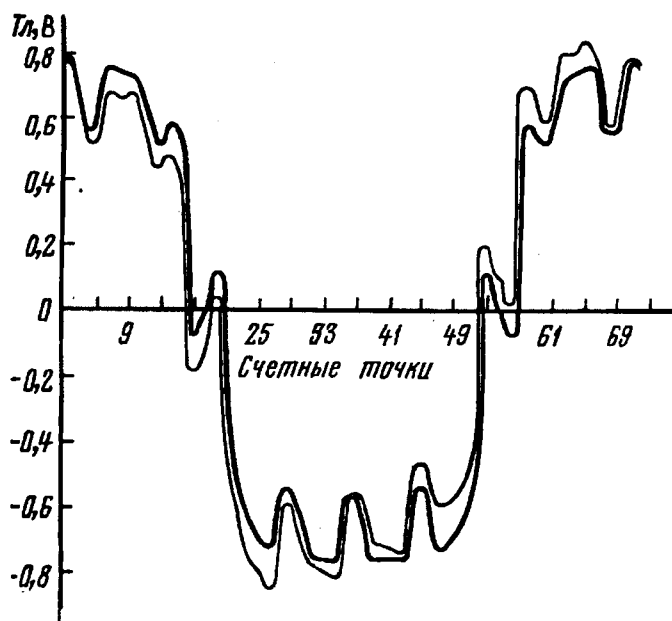


Рис. 7. Нормальная составляющая магнитной индукции на наружной поверхности магнитов: — — ток якоря отсутствует; — — номинальный ток протекает по двум фазам якоря

индукции на наружной поверхности магнитов ротора при обесточенной обмотке якоря и при номинальном токе якоря, протекающем через две фазы (направление тока в фазах  $A$  и  $B$  и положение ротора относительно их осей соответствует рис. 2). Соответствующие распределения СМП на поверхности магнитов приведены на рис. 8.

На рис. 9 показано распределение СМП на поверхностях ротора и расточки статора при отсутствии и наличии тока якоря. Разница ординат кривых 1 и 2 равняется магнитному напряжению воздушного зазора.

Электромагнитный момент ВД с номинальным током в двух фазах якоря, подсчитанный

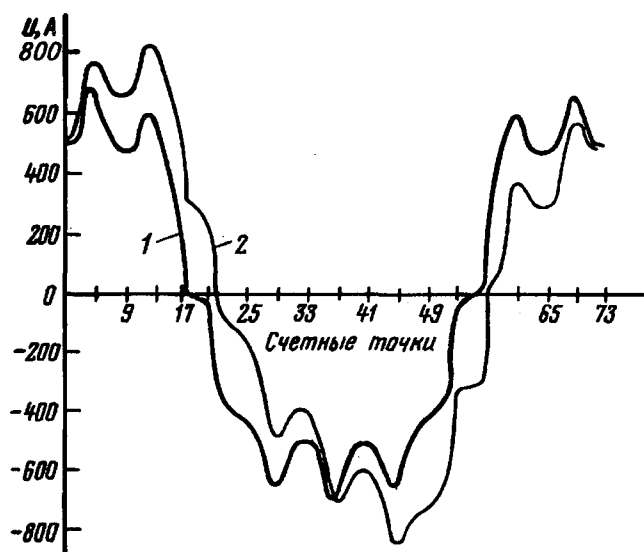


Рис. 8. Скалярный магнитный потенциал на поверхности магнитов: 1 — якорь обесточен; 2 — номинальный ток в двух фазах якоря

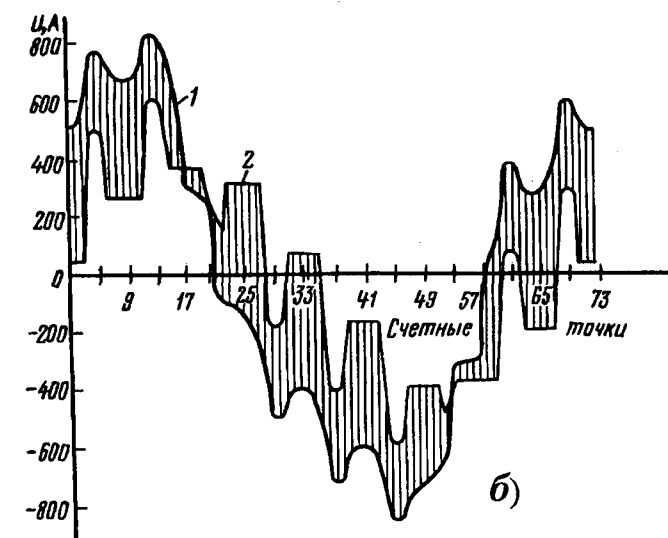
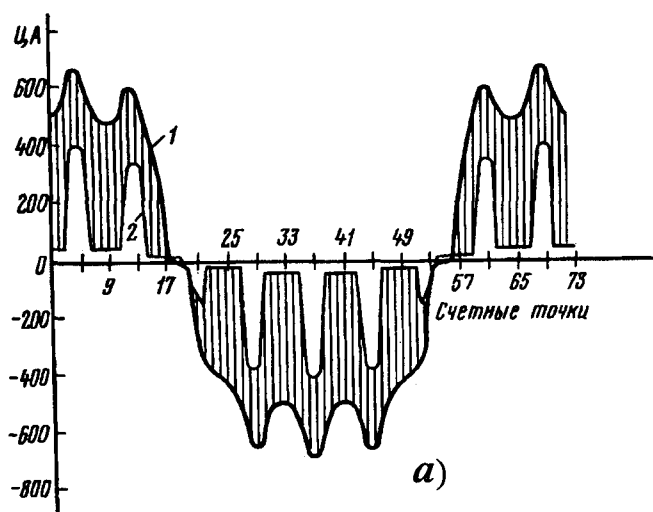


Рис. 9. Скалярный магнитный потенциал на поверхности магнитов (1) и на поверхности расточки статора (2): а — при обесточенном якоре; б — при номинальном токе якоря

по формуле (2) для положения ротора, указанного на рис. 2, составил 8,31 Н·м.

Приложение 1. Выражения для матриц  $[i_g]$  и  $[i_h]$  имеют вид:

$$[i_g] = -\frac{1}{\pi} \begin{bmatrix} \left( \frac{i_{k_1}}{p_1 - \tilde{p}_1} - \frac{i_{k_1}}{p_2 - \tilde{p}_1} \right) & \dots & \left( \frac{i_{k_1}}{p_8 - \tilde{p}_1} - \frac{i_{k_1}}{p_1 - \tilde{p}_1} \right) \\ \dots & \dots & \dots \\ \left( \frac{i_{k_8}}{p_1 - \tilde{p}_8} - \frac{i_{k_8}}{p_2 - \tilde{p}_8} \right) & \dots & \left( \frac{i_{k_8}}{p_8 - \tilde{p}_8} - \frac{i_{k_8}}{p_1 - \tilde{p}_8} \right) \end{bmatrix};$$

$$[i_h] = \begin{bmatrix} -1/i'_1 & 1/i'_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1/i'_1 & 1/i'_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/i'_3 & 1/i'_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/i'_3 & 1/i'_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1/i'_7 & 1/i'_7 \end{bmatrix},$$

где  $i_{k_j} = 1/|\lambda \tilde{p}_j|$ ,  $j=1,2,\dots,8$ .

Приложение 2. Выражения для квадратных матриц в формулах (12)–(15) применительно к четырехугольным ЭУ рис. 1 следующие:

$$[i_S] = \begin{bmatrix} \sin i\alpha_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \sin i\alpha_1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sin i\alpha_4 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \sin i\alpha_4 \end{bmatrix};$$

$$[i_C] = \begin{bmatrix} \cos i\alpha_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \cos i\alpha_1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \cos i\alpha_4 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \cos i\alpha_4 \end{bmatrix}.$$

Выражения для матриц  $[i_{S'}]$  и  $[i_{C'}]$  аналогичны приведенным выражениям, только в них вместо  $i\alpha_j$  ( $j=1,2,\dots,4$ ) фигурируют углы  $i\alpha'_j$ , соответствующие деформированным ЭУ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зечихин В.С., Старовойтова Н.П. Гармонический анализ активных зон генераторов с редкоземельными постоянными магнитами. — Электричество, 1983, № 4.
2. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Коген-Далин В.В., Комаров Е.В. Расчет и испытание систем с постоянными магнитами. — М.: Энергия, 1977.
4. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Астапов В.И., Овчинников И.Е. Намагничивание постоянных магнитов в составе роторов электрических машин. — Электротехника, 1988, № 2.

6. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функции комплексного переменного. — М.: Наука, 1987.
7. Нетушил А.В. Электрические поля в анизотропных средах. — Электричество, 1953. № 3.
8. Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. — М.: Высшая школа, 1986.
9. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах/ А.В.Иванов-Смоленский, Ю.В.Абрамкин, А.И.Власов, В.А.Кузнецов. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
10. Афанасьев А.А. Расчет магнитного поля проводника в пазу электрической машины. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1985, № 4.
11. Афанасьев А.А., Нестерин В.А., Никифоров В.Е. Синхронные двигатели цилиндрического и дискового исполнений с высококоэрцитивными магнитами для вентиляльных двигателей электроприводов станков и роботов. — Тезисы докладов X Всесоюзной конференции по проблемам автоматизированного электропривода. — М.: Информэлектро, 1987.
12. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. — М.: Высшая школа, 1989.
13. Вольдек А.И. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1974.
14. Данилевич Я.Б., Кашарский Э.Г. Добавочные потери в электрических машинах. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.

15. Вольдек А.И. Магнитное поле в воздушном зазоре асинхронных машин. — Труды ЛПИ, 1953, № 3.
16. А.с. 1410208 (СССР). Электродвигатель с постоянными магнитами/ А.А.Афанасьев, С.В.Кириллов, В.А.Нестерин, В.Е.Никифоров. Оpubл. в БИ., 1988, № 26.

[12.01.93]

*Авторы: Афанасьев Александр Александрович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 г. В 1991 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Совместная работа синхронной машины со статическим преобразователем частоты» в МЭИ. Профессор Чувашского госуниверситета.*

*Воробьев Александр Николаевич окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта МЭИ в 1982 г. Ассистент кафедры Чувашского госуниверситета.*

## Об аналогиях в решениях потоковых задач и задач расчета резистивных цепей

БЕРКОВИЧ Е.И.

С единых позиций рассматриваются электрические цепи и потоковые сети, устанавливаются аналогии между ними и отношения дуальности. Приводятся вытекающие из этих аналогий возможные методы расчета таких систем с использованием структурных чисел первого рода для электрических цепей и структурных чисел второго рода для потоковых сетей.

*Electrical circuits and flux networks are considered from the unified point of view. The analogies and dual relationships are established. Possible methods of calculation of such systems are given using structural numbers of the first kind for electrical circuits and of the second kind for flux networks.*

Наличие и полезность аналогий при анализе электрических цепей и потоковых сетей указаны еще в [1]. В основе предлагаемого рассмотрения лежит «потоковый» подход, примененный автором при аналитическом решении задачи о максимальном потоке в некоторой сети [2]. Для разъяснения сущности этого подхода кратко рассмотрим решение упомянутой задачи.

Как известно, задача о максимальном потоке моделируется электрической цепью, все ветви которой состоят из источников тока, шунтированных диодами [1, 2]. На рис. 1,а показан пример такой цепи, к узлам 1 и 5 которой, называемым соответственно истоком и стоком схемы, приложено напряжение источника  $U_0$ . Сущность задачи о максимальном потоке состоит в том, что для заданной сети, пропускная способность которой имеет ограниченную вели-

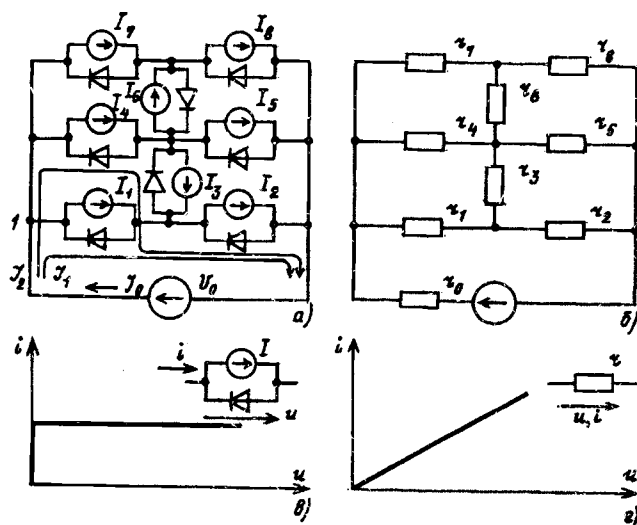


Рис. 1

чину, необходимо найти максимальную величину потока, способного протечь от истока к стоку. Если граф электрической цепи повторяет граф сети, а величины источников тока ветвей цепи равны пропускным способностям ветвей сети, то величина тока  $J_0$  источника напряжения при  $U_0 = 1$  В будет численно равна величине искомого потока. Задача о максимальном потоке решается итерационными методами теории сетей или математического программирования. Рассмотрим аналитический метод определения максимального потока, или, другими словами, определения тока в электрической цепи рис. 1,а. В основе метода решения этой и подобных ей задач лежат операции непрерывнозначной логики, в частности, в данном случае — операции выбора наименьшей величины из заданных, т.е. конъюнкции, обозначаемой знаком « $\wedge$ ».

Для контурных токов  $J_i$  схемы рис. 1,а по всем путям от истока к стоку можно, очевидно, записать:  $J_1 \leq I_1 \wedge I_2$ ,  $J_2 \leq I_4 \wedge I_3 \wedge I_2$ ,  $J_3 \leq I_4 \wedge I_5$ ,  $J_4 \leq I_4 \wedge I_6 \wedge I_8$ ,  $J_5 \leq I_7 \wedge I_8$  и, следовательно,

$$J_0 \leq I_1 \wedge I_2 + I_4 \wedge I_3 \wedge I_2 + I_4 \wedge I_6 \wedge I_8 + I_7 \wedge I_8. \quad (1a)$$

Учитывая, что в электрической цепи благодаря ее оптимизационным свойствам должен установиться максимальный ток от источника питания  $J_0$ , знак неравенства в (1a) должен быть отброшен, что дает

$$J_0 = I_1 \wedge I_2 + I_4 \wedge I_3 + I_4 \wedge I_5 + I_4 \wedge I_6 \wedge I_8 + I_7 \wedge I_8. \quad (1б)$$

Таким образом получено в явном виде выражение для тока  $J_0$ , из которого он может быть непосредственно определен в процессе выполнения операций « $\wedge$ » выбора наименьшей величины и суммирования. Однако предварительно следует остановиться на нескольких особенностях выполнения этих действий. Во-первых, необходимо учитывать, что на оба действия « $\wedge$ » и « $+$ » в отдельности распространяются основные алгебраические законы коммутативности, ассоциативности, а на действие « $\wedge$ » — также и закон идемпотентности:

$$a \wedge a = a. \quad (2a)$$

Во-вторых, при выполнении операций в (1б) должно быть введено правило идемпотентности и для действий суммирования:

$$a + a = a, \quad (2б)$$

физический смысл которого состоит в том, что сколько бы раз ни встречалась одна и та же

величина пропускной способности ветви в виде слагаемого, фактическая пропускная способность ветви остается неизменной и величины  $2a$ ,  $3a$  и т.д. не имеют смысла.

Правило (2б) диктует очередность выполнения действий « $\wedge$ » и « $+$ »: вначале необходимо выполнить суммирование и приведение членов согласно (2б), а затем произвести выбор наименьшей величины. Эти два действия выполняются согласно следующим формулам непрерывнозначной логики:

$$a + b \wedge c = (a + b) \wedge (a + c); \quad (2в)$$

$$a \wedge b + c \wedge d = (a + c) \wedge (a + d) \wedge (b + c) \wedge (b + d) \quad (2г)$$

и т.д.

Подчеркнем, что первоочередность выполнения суммирования должна обязательно соблюдаться только в том случае, если слагаемые имеют одинаковые составляющие, например  $a \wedge b + a \wedge c + c \wedge d$  и т.д. В противном случае очередность действий может быть любой. В итоге, выражение (1б) для определения тока  $J_0$  примет окончательный вид:

$$J_0 = (I_4 = I_1 \wedge I_2 + I_7 \wedge I_8) \wedge [I_5 + I_2 \wedge (I_1 + I_3) + I_8 \wedge (I_6 + I_7)], \quad (3)$$

откуда после подстановки численных значений  $I_i$  определяется искомым ток  $J_0$  (или максимальный поток).

Далее рассмотрим электрическую цепь рис. 1,б, во все ветви которой включены линейные резисторы, величина сопротивлений которых равна  $r_i$ . В процессе такого перехода мы, в сущности, заменили нелинейные «сопротивления» ограниченных пропускных способностей ветвей линейными сопротивлениями этих же ветвей. Действительно, вольт-амперная характеристика (ВАХ) ветви в первом случае нелинейна (рис. 1,в) и ее уравнение  $u \wedge \rho(I - i) = 0$  ( $\rho > 0$ ). Во втором случае ВАХ, очевидно, линейна (рис. 1,г), уравнение ее  $u - ir = 0$ . Поэтому можно предположить, что по аналогии с тем, как оперируя с «сопротивлениями»  $I_i$  мы получили эквивалентное «сопротивление» всей цепи  $J_0$ , оперирование по такой же схеме с сопротивлениями  $r_i$  ветвей может дать эквивалентное сопротивление  $R_0$  всей цепи. Остается найти особенности выполнения алгебраических операций, выполняемых в процессе определения  $R_0$ .

Сопоставление уравнений ВАХ в обоих случаях показывает, что во втором случае ал-

гебраическими операциями должны быть сложение «+» и умножение «·». Исходя из аналогий и физических соображений, предполагаем, что в искомой алгебре также должны выполняться правила идемпотентности для выражений  $r \cdot r$  и  $r+r$  в определенном виде, а именно:

$$r \cdot r = 0 \text{ и } r+r=0, \quad (4)$$

при этом  $r \cdot r \cdot \dots \cdot r = r^n = 0$  ( $n$  — целое число),  $r+r+\dots+r=0$ , если  $n$  — четное и  $r+r+\dots+r=r$ , если  $n$  — нечетное. Как и в случае правил (2а), (2б), правила (4) требуют первоочередного выполнения умножения выражений, содержащих суммирование величин, а затем после попарного перемножения и учета (4) — непосредственно уже суммирования:

$$a \cdot (b+c) = ab+ac; \quad (5a)$$

$$(a+b)(c+d) = ac+dc+ad+bd \quad (5b)$$

и т.д.

Вновь подчеркнем, что соблюдение указанной очередности действий необходимо только для возможности выполнения правил (4) и исключения одинаковых множителей и слагаемых. Если же таковых нет, то очередность действий не имеет значения.

Таким образом, эквивалентное сопротивление  $R_0$  применительно к схеме рис. 1,б может быть определено следующим образом. Для направленных линейно независимых контуров, образуемых путями от узла 1 к узлу 5, записываем величины контурных сопротивлений  $\Delta_i$ :

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= r_1+r_2; \Delta_2=r_4+r_3+r_2; \Delta_3=r_4+r_5; \Delta_4= \\ &= r_4+r_6+r_8; \Delta_5=r_7+r_8, \end{aligned} \quad (6a)$$

и соответственно контурных проводимостей:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta_1} &= \frac{1}{r_1+r_2}; \frac{1}{\Delta_2} = \frac{1}{r_4+r_3+r_2}; \frac{1}{\Delta_3} = \frac{1}{r_4+r_5}; \frac{1}{\Delta_4} = \frac{1}{r_4+r_6+r_8}; \\ \frac{1}{\Delta_5} &= \frac{1}{r_7+r_8}. \end{aligned} \quad (6b)$$

Поскольку все контурные сопротивления (проводимости) соединены параллельно, то результирующая проводимость будет равна сумме контурных. Суммирование с учетом введенной алгебры (4) дает:

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{r_1+r_2} + \frac{1}{r_4+r_3+r_2} = \frac{1}{r_4+r_5} + \frac{1}{r_4+r_6+r_8} +$$

$$+ \frac{1}{r_7+r_8} = \frac{\sum \Delta_{ij}}{\Delta} = \frac{\Delta_\alpha}{\Delta}. \quad (6b)$$

Конкретные значения величин  $\Delta_\alpha$  и  $\Delta$  числителя и знаменателя, получаемых с учетом правил (4) и с использованием дополнительных упрощающих приемов, будут раскрыты ниже.

Таким образом, аналогия с потоковыми сетями привела нас к правилам (4), которые были предложены для расчета электрических цепей еще в [3] и послужили толчком к созданию метода структурных чисел [4]. Метод исходит из того, что в процессе расчета электрической цепи все операции могут быть предварительно выполнены не непосредственно над величинами сопротивлений, а над их индексами, образующими различные комбинации цифр и отображающими структуру графа электрической цепи. Структурное число представляет собой таблицу натуральных чисел — индексов сопротивлений, или, другими словами, номеров ветвей:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{pq} \end{bmatrix}, \quad (7a)$$

причем число элементов в строках и столбцах может быть различным.

Для решения электротехнических задач используются структурные числа, столбцы которых ( $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{n1}$  и т.д.) образуют остовы графа либо дополняющие эти остовы хорды. Замена в результирующем структурном числе элементов столбцов на произведение соответствующих сопротивлений и суммирование полученных произведений дает детерминантную функцию структурного числа, представляющую собой, очевидно, значение определителя матрицы системы уравнений цепи [4].

Описываемые структурные числа, которые мы будем называть далее структурными числами первого рода, образуют коммутативное кольцо, при этом они подчиняются правилам (4), т.е.

$$A \cdot A = 0 \text{ и } A + A = 0. \quad (7b)$$

Структурные числа первого рода подробно разобраны в [4], и здесь мы остановимся только на некоторых соотношениях, имеющих практическое значение для расчета электрических цепей. Если обозначить детерминантную функцию некоторой цепи через  $\Delta$ , а детерминантную функцию этой же цепи с отброшенной ветвью  $\alpha$  через  $\Delta_\alpha$ , то входное сопротивление  $R_0$  ( $\alpha=0$ ) всей цепи относительно этой ветви

$$R_\alpha = \Delta / \Delta_\alpha. \quad (8a)$$

Применительно к выражению (6в) это означает, что сумму числителя  $\Sigma \Delta_{ij}$  мы можем заменить на величину  $\Delta_\alpha$ , определяемую по четырём контурам цепи рис. 1,б, не содержащей ветви 1. Например,  $\Delta_\alpha = (r_1 + r_3 + r_4)(r_2 + r_3 + r_5) \times (r_4 + r_6 + r_7)(r_5 + r_6 + r_8)$ . При этом, как и ранее,  $\Delta = (r_0 + r_1 + r_2)(r_0 + r_4 + r_3 + r_2)(r_0 + r_4 + r_5)(r_0 + r_4 + r_6 + r_8)(r_0 + r_7 + r_8)$ . Входной ток (ток ветви  $\alpha$ )

$$I_\alpha = E_\alpha / R_\alpha. \quad (8б)$$

По известному току  $I_\alpha$  определяется ток произвольной ветви  $I_\beta$  на основании следующего соотношения:

$$\frac{I_\beta}{I_\alpha} = \frac{S(\Delta_\alpha, \Delta_\beta)}{\Delta_\alpha}, \quad (8в)$$

где  $S(\Delta_\alpha, \Delta_\beta)$  — детерминантная функция одинаковых слагаемых в  $\Delta_\alpha$  и  $\Delta_\beta$ , т.е. одинаковых столбцов структурных чисел  $A_\alpha$  и  $A_\beta$ , причем те слагаемые, отбрасывание  $r_i$  которых из схемы даёт одинаковую ориентацию направлений токов в ветвях  $\alpha$  и  $\beta$ , входят в числитель со знаком «+», а те, которые дают противоположную ориентацию, входят со знаком «-». Ниже это правило будет проиллюстрировано на примере схемы рис. 1,б. Аналогично  $\Delta_\alpha, \Delta_\beta$  — детерминантная функция цепи с отброшенной ветвью  $\beta$ .

Таким образом, для определения токов ветвей схемы должны быть найдены различные сочетания произведений сумм сопротивлений контуров с учетом правил (4). Непосредственное умножение выражений в скобках приводит к большому числу слагаемых и, следовательно, к значительной трудоемкости расчета величин  $\Delta, \Delta_\alpha$  и т.д. Усложнено также определение знака перед отдельными слагаемыми в числителе (8в). Особенно следует подчеркнуть, что с ростом размерности цепи резко возрастает число слагаемых в  $\Delta$ , соответствующих числу остовов графа схемы (или числу хорд этих остовов). Поэтому при использовании описываемого подхода целесообразно воспользоваться рекуррентными соотношениями для определения детерминантных функций  $\Delta_i$ . При этом предварительно условимся, что контуры схемы выбраны так, что каждые два контура имеют только одну общую ветвь. Будем исходить из следующего положения:

если известна детерминантная функция  $\Delta_{1-(n-1)}$  произведения известных  $n-1$  однострочных структурных чисел  $a_1, a_2, \dots, a_{n-1}$ , то детерминантная функция  $\Delta_{1-n}$  произведения указанных  $n-1$  сомножителей на  $n$ -й сомножи-

тель, именуемого детерминантную функцию  $\Delta_n$ , равна  $\Delta_{1-(n-1)} \Delta_n$  за вычетом:

членов вида  $\Delta_{1-n[mn]} r_{nm}^2$ , где  $r_{nm}$  — элемент  $n$ -го множителя, входящий одновременно в  $m$ -множитель, а  $\Delta_{1-n[mn]}$  — детерминантная функция всех множителей, кроме  $n$ -го и  $m$ -го;

членов вида  $2\Delta_{1-n[k, \dots, nk, \dots, r_{il}]}$ , где  $r_{nk} \dots r_{il}$  — произведение элемента  $n$ -го множителя на общие элементы других множителей, именуемых попарно общие элементы;  $\Delta_{1-n[k, \dots, l]}$  — детерминантная функция всех остальных множителей.

Для определения функции совпадения  $S(\Delta_\alpha, \Delta_\beta)$  также нет необходимости находить все слагаемые этих величин. Учтем тот факт, что  $\Delta_\alpha$  и  $\Delta_\beta$  отличаются только двумя, тремя или максимально четырьмя множителями: множителями, соответствующими контуру (двум контурам) с ветвью  $\alpha$  и множителями, соответствующими контуру (двум контурам) с ветвью  $\beta$ . Поэтому функция совпадения, а следовательно и знаки слагаемых числителя определяются только по этим двум (четырем) контурам.

Рассмотрим изложенные особенности определения величин  $\Delta, \Delta_2$ , и т.д. на примере схемы рис. 1,б. Поскольку ни детерминантная функция всей схемы  $\Delta$ , ни детерминантная функция части схемы  $\Delta_\alpha$  не зависят от выбора линейно независимых контуров, выберем для выполнения практического расчета цепи контуры по остову графа схемы и его хордам:  $r_1 - r_3 - r_4$ ;  $r_2 - r_3 - r_5$ ;  $r_4 - r_6 - r_7$ ;  $r_5 - r_6 - r_8$ ;  $r_0 - r_1 - r_2$ . Такие контуры будут иметь попарно одну общую ветвь.

Итак, необходимо найти с учетом (4а) произведения  $\Delta_\alpha = (r_1 + r_3 + r_4)(r_2 + r_3 + r_5)(r_4 + r_6 + r_7) \times (r_5 + r_6 + r_8)$  и  $\Delta = \Delta_\alpha (r_0 + r_1 + r_2)$ .

В этих произведениях  $\Delta_1 = r_1 + r_3 + r_4 = 30$ ,  $\Delta_2 = r_2 + r_3 + r_5 = 30$ ,  $\Delta_3 = r_4 + r_6 + r_7 = 37$ ;  $\Delta_4 = r_5 + r_6 + r_8 = 37$  и  $\Delta_5 = r_0 + r_1 + r_2 = 11$  (в омах).

На основании правила рекуррентных преобразований находим поочередно произведение  $\Delta_{1-2}$  первых двух множителей,  $\Delta_{1-3}$  первых трех и т.д., т.е.

$$\Delta_{1-2} = \Delta_1 \Delta_2 - r_3^2 = 611; \quad \Delta_{1-3} = \Delta_{1-2} \Delta_3 - \Delta_2 r_4^2 = 20687; \\ \Delta_{1-4} = \Delta_\alpha = \Delta_{1-3} \Delta_4 - \Delta_{1-2} r_6^2 - \Delta_{1-3} r_5^2 - 2r_3 r_4 r_5 r_6 = \\ = 438665 \text{ (здесь } \Delta_{1,3} = \Delta_1 \Delta_3 - r_4^2 = 1046).$$

Далее определим на основании величины  $\Delta_{1-4} = \Delta_\alpha$  величину  $\Delta_{1-5} = \Delta$ :

$$\Delta_{1-5} = \Delta = \Delta_{1-4} \Delta_5 - \Delta_{1-2} r_1^2 - \Delta_{1,3-4} r_2^2 - 2\Delta_{1-4} r_1 r_2 r_3 - \\ - 2r_1 r_4 r_6 r_5 r_2.$$

Предварительно находим:

$$\Delta_{3-4} = \Delta_3 \Delta_4 - r_6^2 = 1045; \Delta_{1,3-4} = \Delta_3 - \Delta_4 \Delta_1 - \Delta_4 r_4^2 = 28982; \Delta_{2-4} = \Delta_3 - \Delta_4 \Delta_2 - \Delta_3 r_3^2 = 28353.$$

В итоге

$$\Delta_{1-5} = \Delta = 2890338.$$

Таким образом, искомое входное сопротивление

$$R_\alpha = \Delta / \Delta_\alpha = 6,59 \text{ Ом},$$

а ток  $i_\alpha$  через резистор  $r_0$

$$i_\alpha = E / R_\alpha = 15,17 \text{ А}.$$

Определим ток через резистор  $r_1$ . Функция совпадения  $S(\Delta_\alpha, \Delta_\beta)$ , где  $\beta$  — ветвь резистора  $r_1$ , будет определяться общими столбцами структурных чисел графов рис. 2, а (исключена ветвь  $\alpha$ )

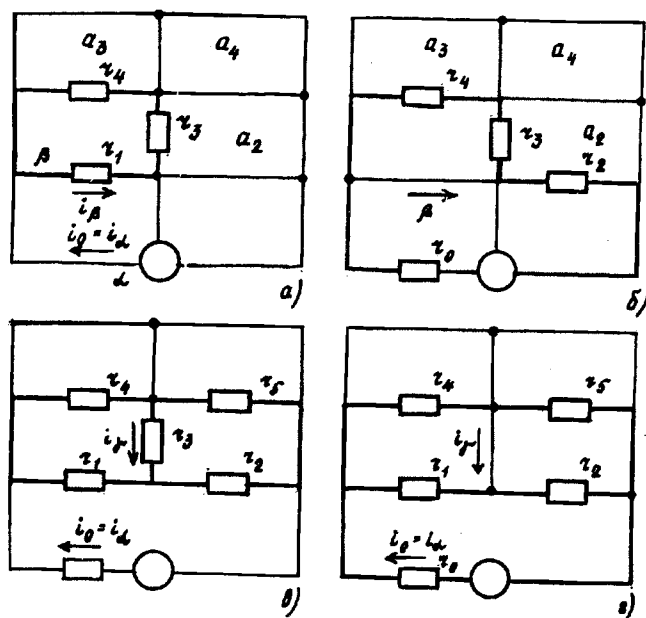


Рис. 2

и рис. 2, б (исключена ветвь  $\beta$ ). Контуры  $a_2$ ,  $a_3$  и  $a_4$  у этих графов общие, поэтому их анализировать не будем, остановимся на отличающихся контурах  $r_1-r_3-r_4$  (рис. 2, а) и  $r_0-r_4-r_3-r_2$  (рис. 2, б). В этих контурах элементы  $r_0$  и  $r_1$  могут быть исключены из рассмотрения как заведомо отличающиеся, а общими являются члены  $r_3$  и  $r_4$ , причем исключение из контура рис. 2, б этих элементов и общих контуров  $a_2, a_3, a_4$  не повлияет на направление тока через резистор  $r_1$ , следовательно этот ток в контуре  $r_0-r_1-r_2$  будет совпадать по направлению с током  $i_0$ . Кроме того, должны быть исключены сла-

гаемые, которые повторяются в структурном числе графа рис. 2, б и одновременно содержатся в структурном числе графа рис. 2, а. Как следует из указанных рисунков, эти величины будут равны  $r_2 r_3 \Delta_{3-4}$  и  $r_2 r_4 r_5 r_6$ . Таким образом,

$$S(\Delta_\alpha, \Delta_\beta) = (r_3 + r_4)(r_2 + r_3 + r_5)(r_4 + r_6 + r_7)(r_5 + r_6 + r_8) - r_2 r_3 \Delta_{3-4} - r_2 r_4 r_5 r_6$$

или

$$S(\Delta_\alpha, \Delta_\beta) = \Delta_{2-4}(r_3 + r_4) - \Delta_{3-4} r_3^2 - \Delta_{2,4} r_4^2 - r_2 r_3 \Delta_{3-4} - r_2 r_4 r_5 r_6 - 2 r_3 r_4 r_5 r_6 = 220656,$$

после чего

$$k_{\alpha\beta} = \frac{S(\Delta_\alpha, \Delta_\beta)}{\Delta_\alpha} = \frac{220656}{438665} = 0,50$$

и ток  $i_\beta$  через резистор  $r_1$

$$i_\beta = k_{\alpha\beta} i_\alpha = 7,585 \text{ А}.$$

Далее определим ток через резистор  $r_3$  (ветвь  $\gamma$ ). Функция совпадения  $S(\Delta_\alpha, \Delta_\gamma)$  будет определяться общими столбцами структурных чисел графов рис. 2, в и г. Отличающиеся контуры и соответственно отличающиеся произведения  $(r_1 + r_3 + r_4)(r_2 + r_3 + r_5)$  и  $(r_0 + r_1 + r_2)(r_1 + r_2 + r_4 + r_6)$  дают одинаковые составляющие  $r_1 r_5$  и  $r_2 r_4$ , причем исключение членов  $r_1 r_5 \Delta_{3-4}$  дает согласное направление токов ветвей  $\alpha$  и  $\beta$ , а исключение членов  $r_2 r_4 \Delta_{3-4}$  — противоположное. В итоге

$$S(\Delta_\alpha, \Delta_\gamma) = r_1(r_5 \Delta_{3-4} - r_3^2 \Delta_3) - r_2(r_4 \Delta_{3-4} - \Delta_4 r_4^2) = 8072;$$

$$k_{\alpha\gamma} = \frac{S(\Delta_\alpha, \Delta_\gamma)}{\Delta_\alpha} = 0,0184,$$

и ток  $i_\gamma$  ветви через резистор

$$i_\gamma = 0,279 \text{ А}.$$

Аналогично определяются остальные токи схемы.

Таким образом, от расчета потока в сетях мы пришли к расчету электрических цепей и исходным положениям метода структурных чисел. Покажем далее, как идеи структурных чисел, в свою очередь, могут быть использованы для расчета максимального потока в сетях. С этой целью рассмотрим новую алгебру структурных чисел — структурных чисел второго рода. Основные положения этой алгебры в упрощенном изложении следующие.

Два структурных числа равны, если они содержат идентичные столбцы, независимо от порядка элементов в столбцах и порядка столбцов. Например, структурные числа

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 \\ 3 & 2 & 7 \\ 6 & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 7 & 4 \\ 1 & 5 & 2 \\ 6 & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 6 & 5 \\ 4 & 3 & 7 \\ & 1 & \end{bmatrix}.$$

Суммой двух структурных чисел  $B_1$  и  $B_2$  называется структурное число, столбцы которого представляют собой объединение всех возможных комбинаций столбцов  $B_1$  и  $B_2$ , при этом: 1) если имеется несколько одинаковых элементов в столбцах, то они заменяются одним; 2) если имеются одинаковые столбцы, то они заменяются одним; 3) если имеются столбцы, среди которых один содержит часть элементов других столбцов и не содержит других элементов, то указанный столбец остается, а остальные исключаются. Например,

$$\begin{bmatrix} 2 & 7 \\ 3 & 8 \end{bmatrix} + [1 \ 3 \ 9] = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 7 & 7 & 7 \\ 3 & 3 & 3 & 8 & 8 & 8 \\ 1 & 3 & 9 & 1 & 3 & 9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 7 & 7 & 7 \\ 3 & 8 & 8 & 8 \\ & 1 & 3 & 9 \end{bmatrix}.$$

Произведением двух структурных чисел  $B_1$  и  $B_2$  называется структурное число, содержащее все столбцы чисел  $B_1$  и  $B_2$ , при этом: 1) если имеются одинаковые столбцы, то они заменяются одним; 2) если имеются столбцы, среди которых один содержит часть элементов остальных столбцов и не содержит других элементов, то указанный столбец остается, а остальные исключаются. Например, если

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 3 & 2 & 1 \\ 1 & 5 & 6 \\ 4 & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 5 & 1 & 5 & 6 \\ & & & 4 & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 5 & 6 \end{bmatrix}.$$

Из определения сложения и умножения следует, что эти операции коммутативны и ассоциативны, умножение дистрибутивно относительно сложения, а сложение — относительно умножения. Для трех произвольных структурных чисел  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  имеем:

$$\begin{aligned} B_1 + B_2 &= B_2 + B_1; B_1 B_2 = B_2 B_1; \\ B_1(B_2 B_3) &= (B_1 B_2) B_3; \\ B_1(B_2 + B_3) &= B_1 B_2 + B_1 B_3; \\ (B_1 + B_2)(B_1 + B_3) &= B_1 + B_2 B_3. \end{aligned} \quad (9a)$$

Кроме того, справедливы правила идемпотентности:

$$B + B = B; B \cdot B = B. \quad (9б)$$

Структурные числа второго рода, определенные на конечном множестве элементов, включают в себя числа «0» и «1». Первое из них представляет собой структурное число-строку, содержащее множество всех элементов  $b_{ij}$ , на которых определены структурные числа, а второе — структурное число-столбец, также содержащее множество всех элементов  $b_{ij}$ . Можно показать, что для структурных чисел

$$B + 0 = B; B \cdot 0 = 0; B \cdot 1 = B; B + 1 = 1. \quad (9в)$$

В рассматриваемой алгебре структурных чисел второго рода, образующих коммутативное кольцо и дистрибутивную решетку, определяются также обратные операции — вычитание и деление, а также устанавливается общий вид делителей нуля. Если столбцы структурных чисел первого рода определяют остовы или хорды соответствующего графа, то столбцы структурного числа второго рода определяют его разрезы или контуры.

Для структурного числа второго рода (под которым будем понимать некоторое положительное число), имеющего вид

$$B = \begin{bmatrix} b_{11}, & b_{12}, & \dots, & b_{1k} \\ b_{21}, & b_{22}, & \dots, & b_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1}, & b_{n1}, & \dots, & b_{pq} \end{bmatrix},$$

введем также понятие детерминантной функции (или модуля):

$$|B| = \bigwedge_{\varphi=1}^{\rho} \sum_{i=1}^{nj} I_{aij}, \quad (9г)$$

где  $I_{aij}$  — заданное множество положительных чисел;  $\bigwedge_{\varphi=1}^{\rho}$  — знак конъюнкции по  $r$  суммам ( $r > l, q$ ).

Например, при

$$B = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 1 \\ 8 & 7 & 5 \\ 9 & 3 & 7 \end{bmatrix} \text{ имеем } |B| = (I_3 + I_8 + I_9) \wedge \wedge (I_2 + I_7 + I_3) \wedge (I_1 + I_5 + I_4).$$

Базируясь на формулах (9а)—(9г) алгебры структурных чисел второго рода, изложим далее один из алгоритмов решения задачи о максимальном потоке.

Если составить структурные числа, строками которых будут индексы ветвей всех направленных путей графа от узла потока к узлу стока, затем найти сумму этих структурных чисел, то де-



терминантная функция (модуль) полученного структурного числа даст значение искомого максимального потока сети. Правильность описанного алгоритма основывается на том, что предусмотренные им операции повторяют операции над индексамй токов  $I_i$  в процессе решения электрической цепи—модели задачи о максимальном потоке в первой части данной статьи.

В частности, для примера рис. 1,а структурные числа направленных путей графа [1 2]; [4 3 2]; [4 5]; [4 6 8]; [7 8]. Сумма этих структурных чисел

$$B = [1\ 2] + [4\ 3\ 2] + [4\ 5] + [4\ 6\ 8] + [7\ 8] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 4 & 3 \end{bmatrix} +$$

$$+ [4\ 5] + [4\ 6\ 8] + [7\ 8] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 2 \\ 4 & 3 & 4 & 5 \\ 5 \end{bmatrix} + [4\ 6\ 8] + [7\ 8] =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & 3 & 3 & 4 & 5 & 5 \\ 5 & 5 & 6 & 8 \\ 6 & 8 \end{bmatrix} + [7\ 8] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 4 & 3 & 4 & 5 & 4 & 3 & 4 & 5 \\ 7 & 5 & 7 & 6 & 8 & 5 & 8 & 8 \\ 6 & 7 & 8 \\ 7 \end{bmatrix}.$$

В итоге максимальный поток

$$J_0 = |B| = (I_1 + I_4 + I_7) \wedge (I_1 + I_3 + I_5 + I_6 + I_7) \wedge (I_1 +$$

$$+ I_4 + I_7) \wedge (I_2 + I_5 + I_6 + I_7) \wedge (I_1 + I_4 + I_8) \wedge (I_1 + I_3 +$$

$$+ I_8) \wedge (I_2 + I_4 + I_8) \wedge (I_2 + I_5 + I_8),$$

где множество  $I_i$  — значения пропускных способностей соответствующих ветвей графа поточковой сети.

В случае более сложных сетей может быть применен иной более машиноориентированный алгоритм, также основанный на структурных числах второго рода. Отличие его от известного алгоритма Форда—Фулкерсона состоит в том, что в нем уточнение потока в процессе итераций расчета производится от большей величины к меньшей и проверка ведется только по направленным маршрутам. В алгоритме Форда—Фулкерсона уточнение потока ведется от меньшей величины к большей и проверку нужно производить также по ненаправленным маршрутам, что заведомо увеличивает вычислительную сложность расчета.

Если полагать, что произведение числа направленных маршрутов от узла истока к узлу стока на среднее число ветвей в маршруте имеет тот же порядок, что и число ветвей графа  $m$ , то вычислительная сложность алгоритма составит  $O(m)$ . В общем случае структуры графа

она возрастает, однако остается ниже величины  $O(m^2)$ .

В заключение изложения сущности предложенных принципов приведем сопоставление основных положений, составляющих потоковый подход в случае решения задачи о максимальном потоке и задачи определения токов в ветвях электрической цепи. Результаты такого сопоставления сведены в таблицу и выявляют достаточно глубокую общность этих двух задач.

Таблица дуальных соответствий линейных электрических цепей и нелинейных электрических моделей потоковых сетей

Характеристики цепей и их решений	Цепь с источниками тока и диодами	Цепь с резисторами
Средства ограничения тока	Источники тока и диоды	Резисторы
Характер ограничения	Нелинейный (ступенчатый)	Линейный
Появление результирующего воздействия	Эквивалентный ток общей цепи	Эквивалентное сопротивление всей цепи
Проявление принципа оптимума	Максимальное значение тока (потока)	Максимальное значение проводимости цепи
Операции для определения результирующего воздействия	Конъюнкция « $\wedge$ » Суммирование « $+$ »	Суммирование « $+$ » Умножение « $\cdot$ »
Особенности выполнения операций	Правила идемпотентности $b \wedge b = b$ , $b + b = b$	Правила идемпотентности $a + a = 0$ $a \cdot a = 0$
Очередность выполнения операций	Вначале суммирование, затем конъюнкция	Вначале умножение, затем суммирование
Особенности выполнения операций над структурными числами	$B + B = B$ , $B \cdot B = B$	$A + A = 0$ , $A \cdot A = 0$
Геометрическая интерпретация структурных чисел	Столбцы соответствуют разрезам или контурам графа	Столбцы соответствуют остовам или хордам графа

**Выводы.** 1. Между линейными электрическими цепями и потоковыми сетями существуют отношения дуальности, при этом общему эквивалентному сопротивлению электрической цепи соответствует общий поток сети, а действия суммирования и умножения в первом случае соответствуют операции конъюнкции и суммирования во втором.

2. В основе свойств дуальности между электрическими цепями и потоковыми сетями лежат свойства дуальности пространств — носителей указанных систем, описываемых структурными числами первого и второго родов.

3. Операции со структурными числами в рамках соответствующих им алгебр позволяют выполнить расчет токов в случае электрических цепей и максимального потока в случае потоковой сети.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деннис Дж.Б. Математическое программирование и электрические цепи. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961.
2. Беркович Е.И. Анализ вентильных моделей при решении задач дискретной оптимизации. — Электричество, 1987, № 2.
3. Wang K.T. On a new method for the analysis of electrical networks, Natl. Res. Inst. for Engineering, Academia Sinica Memoir, 1934, N2.
4. Беллерт С., Возняцкий Г. Анализ и синтез электрических цепей методом структурных чисел. — М.: Мир, 1972.

[07.08.92]

Автор: Беркович Ефим Ильич окончил электротехнический факультет Львовского политехнического института в 1959 г. Защитил в 1990 г. докторскую диссертацию по нелинейным аспектам теории вентильных преобразователей в Институте электродинамики АН Украины. Заместитель директора научно-инженерного центра НПО «Электротехника» (Таллинн, Эстония).

## Накопление заряда в полиэтилене низкой плотности в сильных электрических полях

БОЕВ С.Г., ЛОПАТКИН С.А.

Приводятся результаты исследования электризации плоскопараллельных образцов ПЭНП в постоянном, переменном и импульсном электрических полях. Зондирование заряда производилось акустическим методом. Установлено, что при воздействии постоянного электрического поля напряженностью  $E_v < 5 \cdot 10^4$  В/см в образцах с напыленными, накладными и блокирующими электродами накапливается гетерозаряд обоих знаков, занимающий весь межэлектродный промежуток. При  $5 \cdot 10^4 < E_v < 3 \cdot 10^5$  В/см возможно накопление как гомо-, так и гетерозаряда, что существенно зависит от типа электродов. Увеличение  $E_v$  свыше  $5 \cdot 10^5$  В/см приводит к интенсивной инжекции электронов и дырок из электродов и их генерации в объеме образца. При воздействии переменного и импульсного напряжений незначительное накопление заряда наблюдается лишь при  $E_v > 5 \cdot 10^5$  В/см.

Накопление заряда в твердых диэлектриках является одним из процессов, влияющих на электрическое старение и пробой высоковольтной изоляции. Среди материалов наибольший интерес представляет полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), широко используемый в практике. Известно большое количество работ, в которых по результатам косвенных измерений делается заключение о влиянии объемного заряда на старение и пробой ПЭНП [1]. В ряде работ приводятся результаты измерения распределения заряда в образцах ПЭНП, в том числе полученных акустическим методом. Однако результаты

The results of investigation of the plane-parallel LDPE samples electrification in D.C., A.C. and pulsed electric fields are presented. A space charge distribution was measured using acoustic pulse method. Heterocharge of both signs occupying the whole electrode interface was found to accumulate under D.C. electric field with strength  $E_v < 5 \cdot 10^4$  V/cm in the samples with deposited, implanted and locked electrodes. At  $5 \cdot 10^4$  V/cm  $< E_v < 3 \cdot 10^5$  V/cm it is possible to store both homo- and heterocharge depending essentially on the type of electrodes. Increase in  $E_v$  above  $5 \cdot 10^5$  V/cm leads to intense electron and hole injection from the electrodes and to their generation in a sample bulk. At A.C. and pulse voltage a negligible charge accumulation is observed only with  $E_v > 5 \cdot 10^5$  V/cm.

фрагментарных измерений в различных работах не поддаются систематизации. В данной работе приводятся основные результаты проведенных нами исследований электризации плоскопараллельных образцов ПЭНП, при воздействии однородных постоянного, переменного и импульсного электрических полей различной напряженности. Из-за ограничения объема статьи здесь отдано предпочтение изложению фактического материала в ущерб обсуждению процессов и механизмов накопления объемного заряда.

Методика измерений. К электродам образцов толщиной  $h$  прикладывалось напряжение  $V$  в те-

чение времени  $t_v$  при температуре 18–23°C (рис. 1). После отключения напряжения из-

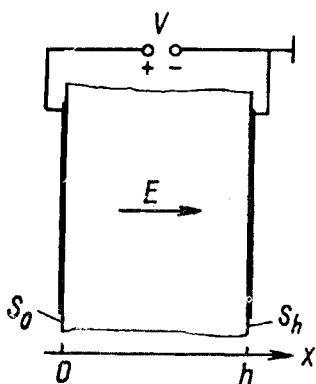


Рис. 1. Общая схема испытательного образца

мерялось распределение объемного заряда в образцах. Измерения проводились при различных значениях  $V/h$ ,  $t_v$  и типах электродов.

Исследовались образцы различных изготовителей, которые обозначим ПЭНП-1, ПЭНП-2, ПЭНП-3. Образцы ПЭНП-1 прессовались из гранулированного полиэтилена марки 15802-020 при температуре 140°C и давлении  $1,3 \cdot 10^{-2}$  Па ( $d=0,914$  г/см<sup>3</sup>), образцы ПЭНП-2 изготовлены из блочного полиэтилена марки 15803-020 ( $d=0,925$  г/см<sup>3</sup>), образцы ПЭНП-3 приготовлены из ПЭНП-2 формовкой при температуре 100°C. Толщина образцов составляла  $0,2 \div 3,0$  мм, диаметр —  $70 \div 80$  мм. Использовались электроды, нанесенные термическим и катодным распылением платины и серебра, термическим распылением алюминия, накладные электроды из латуни и проводящей резины. Использовались также блокирующие электроды, когда между латунным электродом и образцом прикладывалась пленка из ПТФЭ толщиной 10 мкм. Кроме того, использовались инжектирующие электроды, когда приповерхностный слой образца толщиной около 10 мкм подвергался облучению  $\alpha$ -частицами или протонами с поглощенной дозой порядка  $10^6$  Гр. Образцы каждой партии тщательно отбирались по идентичности электрофизических характеристик.

Распределение объемной плотности заряда  $q$  по толщине образцов определялось методом акустического зондирования [2]. Используемое устройство реализации метода на основе обратного пьезоэффекта позволяет зондировать образцы с частотой 1000 Гц, что дает возможность следить за динамикой изменения заряда. Длительность фронта импульсов акустического давления составляла около 50 нс, что обеспечивает разрешающую способность около 10 мкм. Из-

меряемый сигнал регистрировался осциллографом С1-108, а затем при помощи телекамеры и устройства сопряжения вводился в микроЭВМ.

Результаты расчетов напряженности электрического поля в образце и плотности  $q$ , а также измеряемый сигнал распечатывались в виде таблиц и графиков. Компьютерная обработка результатов обеспечила высокую производительность измерений, было прозондировано более 3000 образцов ПЭНП. При различных  $V/h$  измерения проводились через 1–50 с после отключения напряжения. Относительная ошибка измерений поля объемного заряда составляла 5–7% в образцах различной толщины, что определялось зондированием образцов с модельным электрическим полем. Некоторые образцы дополнительно зондировались протонами по описанной в [3] методике. Порог чувствительности метода составляет  $10^2$  В/см, разрешающая способность — около 5 мкм.

Напряженность электрического поля в образце рассматривается как результирующая напряженности поля от внешнего источника  $E_v = V/h$  и поля объемного заряда  $E_q(x)$ ,  $E = E_v + E_q$ . Объемная плотность полного заряда  $q_{\Pi}$  рассматривается как результирующая плотности свободного заряда  $q$  и плотности «поляризационного» заряда  $q_{ss} = -dP_s/dx$ , где  $P_s$  — медленная составляющая релаксационной поляризации. Указанные характеристики связаны известными соотношениями:  $D = \epsilon_0 \epsilon E + P_s$ ,  $dD/dx = q$ ,  $q_{\Pi} = q + q_s$ ; где  $D$  — электрическое смещение [4]. При  $E_v < 5 \cdot 10^4$  В/см поляризационный заряд значителен. О накоплении этого заряда качественно можно судить по результатам акустического зондирования. Действительно, в модели акустического зондирования поляризационный заряд не учитывается и определяется лишь  $E_q$ . Если поляризационного заряда нет, то для вычисленных значений  $E_q$  выполняется условие «закороченного» образца  $\int_0^h E_q(x) dx = 0$ . Если в диэлектрике есть по-

ляризационный заряд, то это условие не выполняется. Количественное определение  $q_s$  производилось сравнением результатов акустического зондирования и зондирования протонами.

**Экспериментальные результаты.** Достаточно хорошая повторяемость результатов наблюдается лишь при  $E_v < 4 \cdot 10^4$  В/см, когда инжекция заряда из электродов незначительна. При этом для образцов каждой партии значения  $E_q$  отличаются обычно меньше, чем на 10%. Для образцов различных партий отличие достигает 70%. При увеличении  $E_v$  значения  $E_q$  и, соответственно,

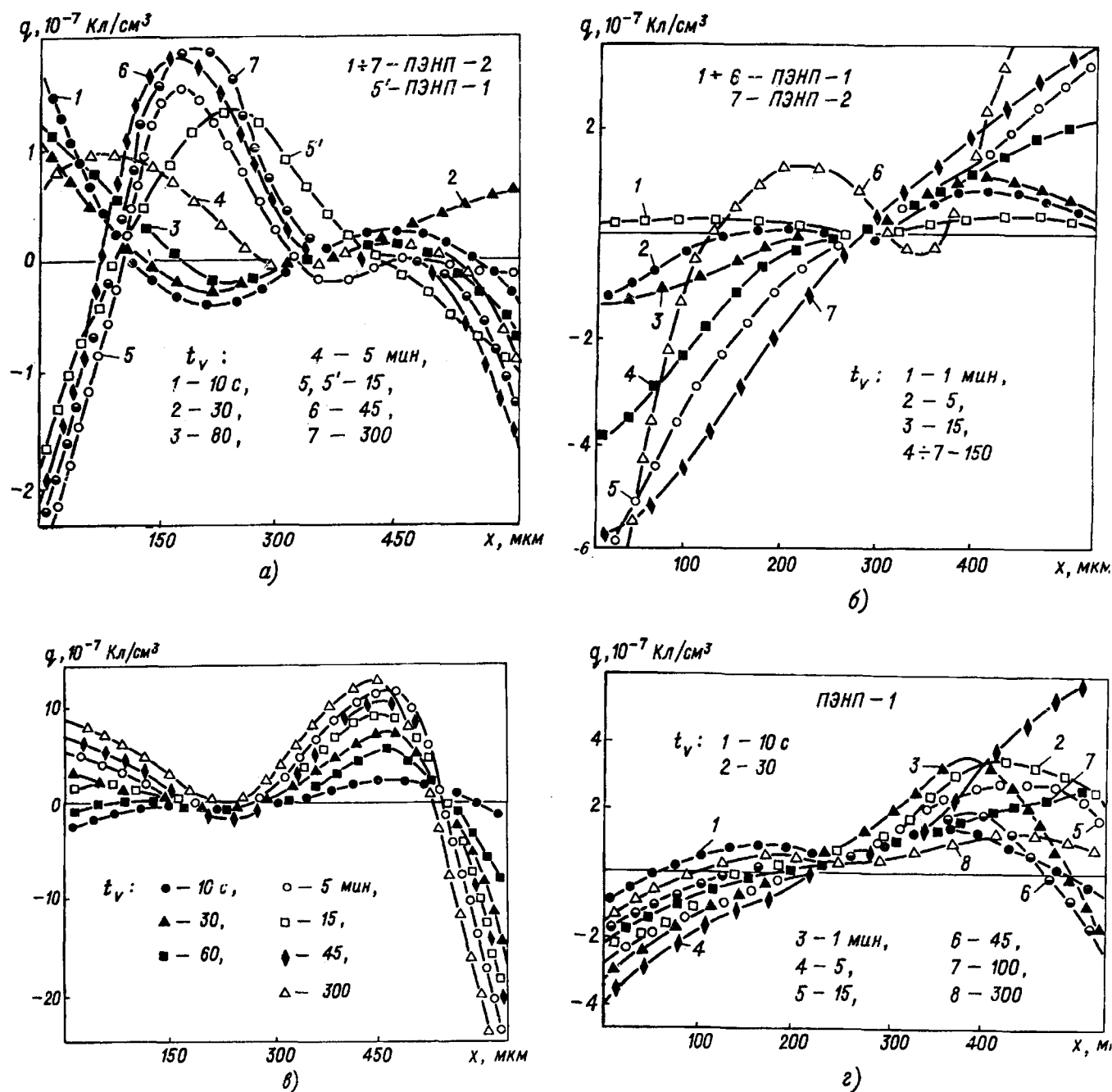


Рис. 2. Распределение заряда в образцах ПЭНП при различных  $t_v$  и электродах: а и б —  $E_v=1 \cdot 10$  В/см; в и г —  $E_v=2 \cdot 10$  В/см; а и в — электроды из напыленного серебра; б — электроды: 1—4, 7 — накладные из латуни; 5 — блокирующие; 6 — из напыленного серебра; г — накладные из латуни

$q$  отличаются значительно (кривые 5,5' на рис. 2,а). В ряде случаев распределение заряда отличается качественно.

Несмотря на указанное отличие полученных результатов для образцов одной из различных партий, можно выделить ряд закономерностей в накоплении и релаксации заряда на постоянном напряжении, которые частично иллюстрируются приведенными на рис. 2 и 3 результатами.

При  $10^4 < E_v < 5 \cdot 10^4$  В/см в образцах толщиной 0,2—3,0 мм с напыленными, накладными и бло-

кирующими электродами накапливается гетерозаряд обоих знаков, занимающий весь межэлектродный промежуток. В накоплении гетерозаряда существенно сказывается неоднородность поляризации вещества в результате неоднородности напряженности электрического поля. При этом значения  $q$  и  $q_s$  сравнимы по порядку ( $10^{-8}$  Кл/см $^3$ ). В образцах с инжектирующими электродами происходит накопление гомо- и гетерозарядов, сравнимых по величине.

При  $5 \cdot 10^4 < E_v < 3 \cdot 10^5$  В/см распределение заря-

да существенно зависит от типа электродов, определяющих интенсивность инжекции электронов и дырок. В образцах с накладными электродами из латуни и проводящей резины и с блокирующими электродами происходит преимущественно накопление гетерозаряда (рис. 2, б, з). Однако величина положительного заряда заметно меньше отрицательного, что можно объяснить частичной нейтрализацией положительного заряда инжектированными с катода электронами, в то время как инжекция дырок при этом менее эффективна. В образцах с напыленными электродами происходит накопление гомо- и гетерозаряда (рис. 2, а, в). При этом результирующее распределение заряда существенно изменяется со временем. Отличие плотности инжекционных токов с различных участков электродов приводит к неоднородности  $q$  в радиальном направлении образца, что определялось секционированием измерительного электрода при акустическом зондировании и зондировании протонами.

При  $E_v > 5 \cdot 10^5$  В/см распределение заряда характеризуется интенсивной инжекцией электронов и дырок из электродов и их генерацией в объеме образцов. Заключение об интенсивной генерации электронов и дырок в объеме образца следует из нелинейного увеличения скорости накопления гетерозаряда. При увеличении  $E_v$  от  $5 \cdot 10^5$  В/см до  $7 \cdot 10^5$  В/см скорость накопления заряда увеличивается более чем на четыре порядка. При этом не наблюдается заметного отличия в накоплении заряда в образцах с напыленными, накладными и блокирующими электродами. Значения плотности зарядов разного знака сравнимы (рис. 3). Величина  $P_s$  незначительна,  $P_s \ll \varepsilon_0 \varepsilon E_q$ .

При исследовании влияния  $t_v$  на накопление заряда при различных  $E_v$  установлено, что ква-

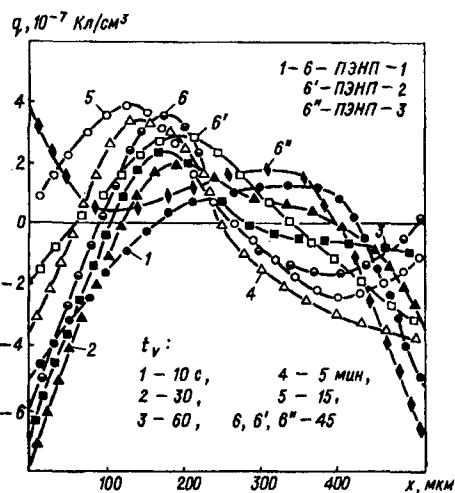


Рис. 3. Распределение заряда в ПЭНП ( $E_v = 5,7 \cdot 10^5$  В/см, накладные электроды из латуни)

зистационарное состояние в распределении заряда (когда при изменении  $t_v$  в несколько раз изменений  $q$  практически не происходит) наблюдается лишь при  $E_v < 10^4$  В/см. При  $E_v > 10^5$  В/см  $q$  заметно изменяется в течение нескольких часов (рис. 2), что объясняется неравномерным по объему изменением концентрации квазисвободных электронов и дырок за счет непрерывной инжекции их из электродов и генерации в объеме образцов.

Одним из факторов, влияющих на накопление объемного заряда в полиэтилене, является неоднородность удельной объемной электрической проводимости, обусловленная неоднородностью надмолекулярной структуры. Такие образцы вывлялись по характерному распределению объемного заряда после воздействия постоянного электрического поля напряженностью порядка  $10^4$  В/см. Определение неоднородности надмолекулярной структуры диэлектриков регистрацией объемного заряда можно эффективно использовать для контроля качества материалов.

Релаксация заряда после снятия напряжения существенно зависит от  $E_v$  и  $t_v$ . После воздействия электрического поля напряженностью менее  $5 \cdot 10^4$  В/см в течение нескольких часов происходит качественное изменение заряда  $q$  со временем, обусловленное различной скоростью релаксации  $q$  и  $q_s$ . Значительное разрушение поляризации происходит за время менее 30 мин, в то время как свободный заряд сохраняется в течение десятков часов.

При  $E_v > 10^5$  В/см релаксация заряда сильно зависит от  $E_v$  и  $t_v$ . С увеличением  $E_v$  и  $t_v$  скорость релаксации заряда увеличивается (рис. 4). При

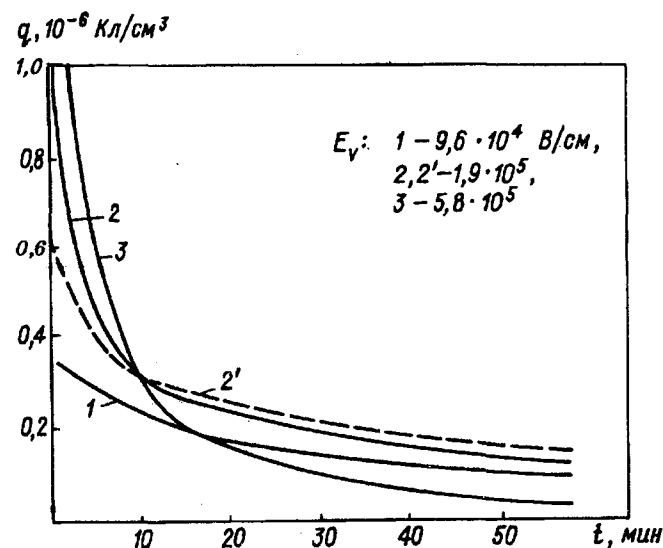


Рис. 4. Релаксация  $q$  в ПЭНП-1 со временем при  $x/h = 0,3$  (электроды из напыленного серебра,  $h = 520$  мкм); 1-3 —  $t_v = 10$  мин, 2' —  $t_v = 3$  мин

этом качественное распределение заряда практически не изменяется или изменяется незначительно, что зависит также от  $h$ . Увеличение скорости релаксации объясняется термическим освобождением локализованных электронов и дырок, концентрация которых определяется эффективностью внутренней (полевой) генерации и плотностью инжекционных токов в условиях воздействия электрического поля и возрастает с увеличением  $E_v$  и  $t_v$ . В случае, когда концентрация локализованных электронов и дырок слабо изменяется с координатой и значительно больше концентрации избыточных электронов и дырок, проводимость образца близка к однородной и перераспределения объемного заряда со временем не происходит.

Из результатов экспериментального исследования заряда  $q$  в ПЭНП при воздействии постоянного напряжения следует, что накопление гетерозаряда не определяется блокирующим характером контакта металл—образец. Проведенные оценки показали, что при  $E_v > 10^4$  В/см диффузионная составляющая тока пренебрежимо мала по сравнению с током за счет транспорта собственных носителей заряда в электрическом поле. Кроме того, гетерозаряд накапливается даже в образцах с инжектирующими электродами. Накопление гетерозаряда объясняется захватом собственных носителей заряда на глубокие уровни локализации при их макроскопическом смещении в электрическом поле.

Накопление гомозаряда в постоянном электрическом поле незначительно при  $E_v < 5 \cdot 10^4$  В/см в образцах с напыленными и наклепанными электродами, однако при создании инжектирующих электродов облучением приэлектродного слоя ионами инжекция электронов и дырок происходит достаточно эффективно уже при  $E_v = 10^4$  В/см. В образцах с напыленными электродами из серебра, алюминия и платины инжекция электронов заметна при  $E_v > 4 \cdot 10^4$  В/см, однако при  $E_v < 10^5$  В/см гомозаряд значительно меньше гетерозаряда. Инжекция дырок в образцы с напыленными электродами заметна лишь при  $E_v > 10^5$  В/см. Эффективные подвижности электронов  $\mu_n$  и дырок  $\mu_p$ , полученные по глубине инжекции заряда  $l$  за время  $t_v$  ( $l = \mu_{n,p} E_v t_v$ ), заметно не отличаются и при  $E_v = 10^5 \div 8 \cdot 10^5$  В/см для различных партий ПЭНП находятся в пределах  $8 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/(В·с).

Исследования накопления объемного заряда в ПЭНП при воздействии импульсного напряжения проводилось при длительности фронта и импульса 3 и 4 мкс, частота следования импульсов варьировалась в пределах 10—400 импульсов в

секунду. Амплитудное значение напряженности электрического поля изменялось в пределах  $(4 \div 8) \times 10^5$  В/см. При указанных условиях накопление заряда наблюдалось лишь при значениях  $t_v$ , близких к ресурсу (для ПЭНП-1 при  $E_v = 7,5 \cdot 10^5$  В/см и вероятности пробоя  $P = 0,632$  ресурс образцов составляет  $1,4 \cdot 10^6$  импульсов, а при  $P = 0,81$  —  $2,6 \cdot 10^6$  импульсов). Объемная плотность заряда обычно не достигает  $10^{-7}$  Кл/см<sup>3</sup>.

Незначительное накопление заряда не может быть обусловлено малым ресурсом образцов в электрическом поле. Действительно, при длительности импульса 4 мкс и ресурсе  $2,6 \cdot 10^6$  импульсов общее время действия электрического поля составляет около 10 с. В постоянном электрическом поле при аналогичных напряженности и времени воздействия накапливается значительный заряд (рис. 3), в импульсном же электрическом поле накопление заряда незначительно даже в образцах, выдержавших  $(3 \div 5) \cdot 10^6$  импульсов.

Слабое накопление инжектированного заряда можно объяснить экстракцией инжектированных электронов или дырок (в зависимости от полярности напряжения) во время паузы между импульсами. Оценим глубину инжекции заряда  $l$  за время действия импульса напряжения. Подвижность инжектированных электрона и дырки уменьшается от значений микроскопической подвижности [ $10^{-3}$  см<sup>2</sup>/(В·с)] до значений эффективной подвижности [ $10^{-8}$  см<sup>2</sup>/(В·с)] за время более 1 с [5]. Следовательно, за время импульса и паузы мы имеем дело с дрейфовой подвижностью. Однако даже если предположить, что за время действия импульса напряжения средняя подвижность инжектированных носителей равна  $10^{-4}$  см<sup>2</sup>/(В·с), то при  $E_v = 8 \cdot 10^5$  В/см глубина инжекции составит всего  $l = \mu E_v \tau_n = 5,6$  мкм. При этом электрическое поле объемного заряда сосредоточено в основном в слое  $0 < x < l$  и за время паузы между импульсами происходит экстракция инжектированных носителей в электрическом поле объемного заряда.

В случае, если за время паузы релаксации заряда не происходит, то при последующих импульсах должно происходить увеличение инжектированного заряда. Результаты же проведенных измерений показали, что величина инжектированного в образцы заряда незначительна. С другой стороны, в ряде случаев регистрируется заметный заряд в объеме образцов, который нельзя объяснить инжекцией электронов и дырок из электродов, так как даже при максимальных значениях  $\mu$  носители не способны проникнуть на

глубину 0,5—1 мм при количестве воздействующих импульсов менее  $10^6$ , когда общее время воздействия электрического поля на образец составляет менее 10 с. При этом следует предположить, что накопление объемного заряда обусловлено транспортом электронов и дырок, генерируемых в объеме образца электрическим полем.

Накопление заряда в образцах на переменном напряжении может происходить за счет различной интенсивности инжекции электронов и дырок и отличия значений их подвижностей. С другой стороны, при изменении полярности напряжения может происходить не только инжекция носителей заряда противоположного знака, но и экстракция значительной части накопленного заряда. В сильных электрических полях в транспорте заряда могут играть значительную роль генерированные электрическим полем электроны и дырки.

Результаты экспериментальных исследований показали, что незначительное накопление заряда происходит лишь при значениях  $t_v$ , составляющих десятки часов. Объемный заряд с максимальным значением  $q$  менее  $5 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>3</sup> занимает весь межэлектродный промежуток. Незначительное накопление заряда, очевидно, связано с небольшим отличием подвижностей электронов и дырок. Распределение заряда в различных образцах, подвергнутых воздействию электрического поля при идентичных условиях, качественно разнообразно и не поддается систематизации. Какие-либо закономерности — зависимости накопления объемного заряда от  $E_v$ ,  $t_v$  и  $h$  — обнаружить не удалось.

Влияние объемного заряда на конфигурацию электрического поля в образцах ПЭНП при воздействии постоянного напряжения зависит от  $E_v$ ,  $t_v$  и  $h$ . При  $E_v < 5 \cdot 10^4$  В/см в образцах происходит преимущественно накопление гетерозаряда и усиление электрического поля в приэлектродных областях. В образцах с блокирующими электродами величина гетерозаряда возрастает с увеличением  $E_v$  до  $10^5$  В/см (рис. 2,б). В электризованных образцах при  $E_v = 0$  (после снятия с образца напряжения) имеются две плоскости нулевого поля, в которых вектор напряженности электрического поля объемного заряда изменяет направление. При этом напряженность электрического поля усиливается вблизи электродов и уменьшается в середине образца. Величина  $E/E_v$  зависит от  $h$  и значительно не отличается для образцов различных партий:

$h$ , мм	0,75	0,3	0,52	0,96	1,83	2,63
$E/E_v$	0,85— 1,07	0,81— 1,1	0,77— 1,15	0,75— 1,15	0,65— 1,18	0,7— 1,2

Приведенные значения  $E/E_v$  являются средними по результатам зондирования пяти—семи образцов каждой толщины. Заметим, что поскольку величина и качественное распределение гетерозаряда положительного и отрицательного знаков несколько отличаются, то соответственно и напряженности электрического поля вблизи электродов отличаются. Приведенные выше максимальные значения  $E/E_v$  соответствуют максимальным значениям  $E_q$  вблизи электродов.

Уменьшение напряженности электрического поля в центральной части образцов с гетерозарядом происходит на большую величину, чем увеличение  $E$  в приэлектродных областях. Это обусловлено тем, что объемный заряд занимает весь межэлектродный промежуток. Соответственно, если изменить полярность приложенного к образцу напряжения, то максимальная напряженность электрического поля в образце будет выше  $E_v$ . Следовательно, пробой кабелей постоянного напряжения при изменении полярности приложенного напряжения может происходить за счет накопления гетерозаряда. Обычно же этот результат связывают с накоплением гомозаряда.

Из приведенных выше данных следует, что с уменьшением  $h$  влияние гетерозаряда на  $E$  уменьшается. Это объясняется незначительным изменением заряда  $q$  в образцах при изменении  $h$  и уменьшением расстояния от электрода до ближайшей плоскости нулевого поля, а также между плоскостями нулевого поля. Максимальные и минимальные значения  $E/E_v$  за счет накопления гетерозаряда наблюдались в образцах ПЭПН-2 с блокирующими электродами при  $E_v = 8 \cdot 10^4$  В/см. При  $h = 0,5 \div 1,5$  мм минимальное значение составляет 0,62, максимальное — 1,52.

Из анализа результатов следует, что в образцах толщиной менее 300 мкм гетерозаряд незначительно влияет на напряженность электрического поля в образцах. При  $h > 0,3$  мм уменьшение и увеличение  $E$  в различных участках образцов может достигать соответственно 40 и 50%.

В образцах с напыленными электродами при  $E_v > 5 \cdot 10^4$  В/см и в образцах с накладными электродами при  $E_v > 10^5$  В/см наряду с накоплением гетерозаряда происходит накопление инжектируемого заряда. При этом результирующее распределение заряда имеет сложный вид (рис. 2). Достаточно часто напряженность электрического поля вблизи одного из электродов увеличивается, в то время как вблизи противоположного умень-

шается. Причем со временем распределение заряда существенно изменяется, и соответственно изменяются  $E$  и  $E/E_v$ . Однако, как следует из проведенного анализа результатов, при изменении распределения заряда со временем максимальные значения  $q$  существенно не изменяются. При  $E_v < 5 \cdot 10^5$  В/см значения  $E/E_v$  наблюдались в пределах 0,65—1,5. В таблице приведены интервалы значений  $E/E_v$  для ПЭНП-1, полученные по результатам зондирования образцов с различными электродами (зондировалось по 10 образцов для каждого значения  $E_v$  и типа электродов).

Электроды	Значения $E/E_v$ для образцов ПЭНП-1 с различными электродами, $n=0,52$ мм	
	$E_v=10^5$ В/см	$E_v=2 \cdot 10^5$ В/см
Напыленное серебро	0,75—1,30	0,73—1,45
Накладные из латуни	0,91—1,23	0,87—1,13
Инжектирующие	0,81—1,18	0,86—1,24

Неоднородность инжекции заряда в образцы с различных участков электродов, которая особенно значительна при  $E_v=(1 \div 3) \cdot 10^5$  В/см, можно существенно уменьшить созданием инжектирующих электродов. В образцах с инжектирующими электродами неоднородность заряда в радиальном направлении обычно не превышает 10%.

При  $E_v > 5 \cdot 10^5$  В/см, несмотря на сильное увеличение интенсивности процессов транспорта собственных и инжектированных из электродов носителей заряда, максимальные значения  $q$  возрастают незначительно. Значения  $E/E_v$  в тридцати пяти измеренных образцах ПЭНП-1 при  $h=0,5$  мм и  $E_v=(5 \div 8) \cdot 10^5$  В/см находились в пределах 0,61—1,4. Для тридцати образцов ПЭНП-3 получено  $E/E_v=0,64 \div 1,43$ . При  $E_v=8 \cdot 10^5$  В/см в образцах толщиной 0,5 мм в ряде случаев происходил электрический пробой, что объясняется увеличением  $E/E_v$  за счет накопления объемного заряда. Действительно, при уменьшении  $h$ , когда значения  $E/E_v$  уменьшаются, пробой не наступает.

Исходя из полученных результатов можно

рекомендовать создание инжектирующих электродов для уменьшения гетерозаряда в образцах при  $E_v < 10^5$  В/см. При  $E_v > 10^5$  В/см, когда инжекционные токи практически не зависят от типа электродов и происходит интенсивная генерация носителей в объеме образцов, изменения  $q$  и  $E/E_v$  можно, вероятно, добиться лишь изменением характеристик материала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Боев С.Г., Падерин В.А. Диагностика электрического поля в диэлектриках облучением тяжелыми заряженными частицами. — Приборы и техника эксперимента, 1987, № 5.
4. Боев С.Г. Расчет электрического поля заряженного диэлектрика. — Электричество, 1984, № 12.
5. Электрические явления при облучении полимеров/ А.П.Тютнев, А.В.Ванников, Г.С.Мингалеев, В.С.Саенко. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

[14.03.92]

*А в т о р ы : Боев Сергей Григорьевич в 1971 г. окончил электрофизический факультет Томского политехнического института (ТПИ). В 1990 г. в Московском институте электронного машиностроения защитил докторскую диссертацию по специальности «Физика полупроводников и диэлектриков». Заведующий лабораторией НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете (бывший ТПИ).*

*Лопаткин Сергей Анатольевич в 1983 г. окончил электроэнергетический факультет Абаканского филиала Красноярского политехнического института. В 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Электроизоляционная и кабельная техника» в ТПИ. Старший научный сотрудник НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете.*



# Синтез волновых фильтров с переключаемыми конденсаторами

ДАНИЧЕВ А.М., КАСЬЯНОВ А.И.

Предложен новый метод синтеза фильтров с переключаемыми конденсаторами (ФПК), моделирующих волновые уравнения лестничных двусторонне нагруженных LC-цепей. Метод позволяет проектировать волновые ФПК в виде  $\Pi$ -каскадного соединения четырехполюсников и в виде топологически полной структуры. Приведены результаты машинного проектирования и моделирования фильтров.

**Введение.** В теории синтеза фильтров с переключаемыми конденсаторами (ФПК) широко распространены фильтры, моделирующие уравнения двусторонне нагруженных лестничных LC-цепей. Такие ФПК имеют низкую чувствительность частотных характеристик к вариациям параметров активных и пассивных элементов и могут быть сравнительно просто получены непосредственно по схеме LC-прототипа. Моделирование волновых уравнений пассивных цепей позволяет, кроме того, добиться отсутствия у ФПК паразитных колебаний и устойчивости к вынуждающему воздействию, получить новые схемные решения.

В статье [1] А.Феттвайсом разработана методика синтеза волновых цифровых фильтров (ЦФ). Авторам работ [2, 3] удалось реализовать уравнения, полученные А.Феттвайсом, в элементном базисе ФПК. Однако, число операционных усилителей (ОУ) в волновых ФПК (ВФПК) в 1,5—4 раза превышает количество реактивных элементов прототипа, кроме того, требуется многофазная система управляющих импульсов. Цель настоящей работы — модернизировать методику А.Феттвайса применительно к синтезу ВФПК без указанных выше недостатков.

**Основные уравнения волновых фильтров.** Величины падающей  $a$  и отраженной  $b$  волн на зажимах произвольного пассивного двухполюсника связаны со значениями напряжения  $u$  и тока  $i$  известными соотношениями:

$$a = u + Ri, \quad b = u - Ri,$$

где  $R$  — волновое сопротивление двухполюсника.

В соответствии с методикой, изложенной в [1], волновой ЦФ образуют  $\Pi$ -каскадным включением параллельных и последовательных адапторов, нагруженных на элементы задержки, на входное  $R_1$  и нагрузочное  $R_2$  сопротивления. Назначение адапторов — реализация волновых уравнений параллельно и последовательно соединенных ветвей, а также согласование волновых сопротивлений элементов, присоединенных к каждой паре их зажимов. Элементы задержки реализуют соотношения

The new method is proposed for synthesis of filters with commutable condensers (FCC) for modelling of wave equations of LC-circuits of stair structure with double side load. The method allows to design wave FCC in the form of  $\Pi$ -cascade connection of quadripoles as well as in the form of full topological structure. The results of computer-aided design and modelling of FCC are presented.

$$\tilde{a}_i = \pm \tilde{b}_i Z^{-1}, \quad (1)$$

где  $Z = e^{j\omega T}$ ;  $\omega$  — частота входного сигнала;  $T$  — период дискретизации.

Для примера на рис. 1 изображен волновой сигнальный граф, соответствующий двусторонне

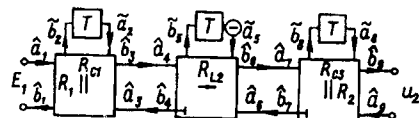


Рис. 1. Волновой сигнальный граф с адапторами

нагруженному LC-фильтру с передаточной функцией нижних частот третьего порядка.

Последовательный  $2n$ -полюсный адаптор характеризуется системой уравнений

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\gamma_1 & -\gamma_1 & \cdots & -\gamma_1 \\ -\gamma_2 & (1-\gamma_2) & \cdots & -\gamma_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\gamma_n & -\gamma_n & \cdots & (1-\gamma_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\gamma_i, i = \overline{1, n}$  — вещественные коэффициенты, вычисляемые по формуле

$$\gamma_i = \frac{2R_i}{R_1 + R_2 + \dots + R_n}; \quad (3)$$

$R_i$  — волновые сопротивления элементов, присоединенных к  $i$ -й паре зажимов.

Система уравнений для параллельного адаптора имеет вид

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1-1 & \gamma_2 & \cdots & -\gamma_n \\ \gamma_1 & (\gamma_2-1) & \cdots & \gamma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\gamma_1 & \gamma_2 & \cdots & (\gamma_n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $\gamma_i, i = \overline{1, n}$  — вещественные коэффициенты, вычисляемые по формуле

$$\gamma_i = \frac{2G_i}{G_1 + G_2 + \dots + G_n}; \quad (5)$$



— число пар зажимов  $i$ -го адаптора.

Для исключения промежуточных переменных выполним подстановку:

$$\begin{cases} \hat{b}_1 = \hat{a}_{i+1}, & i = \overline{3, m-2}; \\ \hat{a}_1 = \hat{b}_{i+1}, & i = \overline{3, m-2}. \end{cases} \quad (11)$$

При реализации входной функции пассивной цепи, выходной величиной является  $\hat{b}_1$ , а при сквозной функции —  $\hat{b}_m$ . Ниже, для определенности, рассматривается реализация сквозной функции. В большинстве случаев ЭДС на выходе фильтра отсутствует, т.е.  $a_m = 0$ , поэтому коэффициенты  $m$ -го столбца матрицы (10) не учитываются. Выполнив преобразования (11) в системе (10), получим

$$\begin{bmatrix} \hat{b}_2 \\ \hat{b}_5 \\ \vdots \\ \hat{b}_{m-1} \\ \hat{b}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{2,1} & C_{2,2} & \dots & C_{2,m-1} \\ C_{5,1} & C_{5,2} & \dots & C_{5,m-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m-1,1} & C_{m-1,2} & \dots & C_{m-1,m-1} \\ C_{m,1} & C_{m,2} & \dots & C_{m,m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \vdots \\ \hat{a}_{m-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

где  $C_{ij}$  — вещественные элементы матрицы.

Учитывая (1) и соотношение  $\hat{a}_1 = E_1$ , переходим к волновым уравнениям переменных состояния:

$$\begin{bmatrix} \hat{b}_2 \\ \hat{b}_5 \\ \vdots \\ \hat{b}_{m-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{2,2} & C_{2,5} & \dots & C_{2,m-1} \\ C_{5,2} & C_{5,5} & \dots & C_{5,m-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m-1,2} & C_{m-1,5} & \dots & C_{m-1,m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{b}_2 Z^{-1} \\ \hat{b}_5 Z^{-1} \\ \vdots \\ \hat{b}_{m-1} Z^{-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{2,1} \\ C_{5,1} \\ \vdots \\ C_{m-1,1} \end{bmatrix} E_1; \quad (13)$$

$$\hat{b}_m = [C_{m,2} \ C_{m,5} \ \dots \ C_{m,m-1}] \begin{bmatrix} \hat{b}_2 Z^{-1} \\ \hat{b}_5 Z^{-1} \\ \vdots \\ \hat{b}_{m-1} Z^{-1} \end{bmatrix} + C_{m,1} E_1.$$

Отметим, что поскольку матрицы (2) и (4) содержат не более одного нулевого коэффициента, а матрицы (11) — блочно-диагональная, то все  $C_{ij} \neq 0$  ( $i = \overline{2, m}, j = \overline{1, m-1}$ ).

Следовательно, схема, реализующая (13) при помощи суммирующих интеграторов, имеет топологически полную структуру (ТПС), т.е. с выходов всех звеньев всегда имеются обратные и прямые связи на входы всех звеньев.

Каждый коэффициент матрицы реализуется двумя переключаемыми конденсаторами таким образом, что схемы, имитирующие различные лестничные LC-прототипы с заданным количеством реактивных элементов, отличаются друг от друга лишь величинами емкостей конденсаторов (фази-

ровка ключей и топология схемы не изменяются). Это позволяет проектировать универсальные фильтры высокого порядка. Количество ОУ в таких ВФПК равно количеству реактивных элементов прототипа плюс один ОУ, реализующий выходную величину.

**Результаты моделирования.** На основе вышеизложенных методик разработан комплекс программ для автоматизированного проектирования ВФПК. Результаты анализа фильтров нижних частот, спроектированных на ЭВМ по различным методикам, сведены в таблицу. Здесь представлена оценка чувствительности соответственно ВФПК с графом-рис. 2, ВФПК с ТПС, ФПК, моделирующего по известной методике [6] уравнения переменных состояния пассивной лестничной цепи.

Относительная частота сигнала $f/F_T$	Модуль передаточной функции $ H(f) $	Чувствительность		
		СЧП	ТПС	УПС
0	1	0,555	0,345	0,457
0,02	0,997	0,578	0,344	0,446
0,04	0,992	0,608	0,324	0,432
0,06	0,989	0,600	0,302	0,406
0,08	0,992	0,756	0,281	0,396
0,1	1	0,829	0,341	0,471
0,12	0,982	0,925	0,467	0,604
0,14	0,874	0,954	0,605	1,165
0,16	0,664	0,916	0,697	1,433
0,18	0,450	0,812	0,732	1,293
0,2	0,295	0,742	0,712	0,739

Для оценки параметрической чувствительности ФПК рассматривались средние отклонения АЧХ в результате статистического моделирования по методу Монте-Карло. При этом величины емкостей всех конденсаторов фильтра изменялись случайным образом в диапазоне технологического допуска (относительная погрешность реализации емкостей не превышает 0,1–0,6% в зависимости от абсолютного значения величины емкости). Для построения каждой характеристики

выполнено 100 испытаний.

Приведенные в таблице результаты показывают, что все предложенные структуры ВФПК не уступают, а в ряде случаев могут выигрывать по величине параметрической чувствительности в сравнении с известными ФПК некаскадных структур. Как правило ВФПК с ТПС (рис. 3) обладают

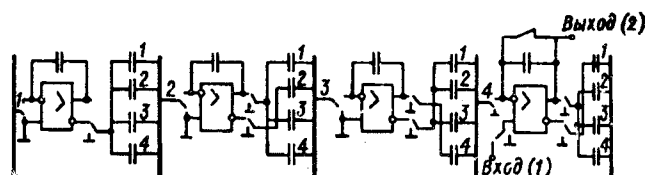


Рис. 3. Универсальный ВФПК с передаточной функцией третьего порядка

наиболее низкой чувствительностью.

Отметим, что в статье [7], посвященной поиску оптимальной структуры ARC-фильтров, показано, что для снижения параметрической чувствительности активной схемы необходимо увеличение количества связей между звеньями, что хорошо согласуется с полученными выше результатами.

**Выводы.** 1. Разработаны методы и создано программное обеспечение для автоматизированного синтеза ФПК, моделирующих волновые уравнения лестничных LC-цепей П-каскадным соединением четырехполюсников и топологически полной структурой.

2. Предложенные ВФПК при двухфазной системе управляющих импульсов содержат в 2—4 раза меньше операционных усилителей по сравнению с фильтрами, использующими ПК-адапторы. По количеству конденсаторов и ключей ВФПК уступают фильтрам, получаемым методами операционной имитации на основе интеграторов. Низкочувствительные универсальные схемы волновых фильтров с ТПС могут использоваться при разработке базовых кристаллов ФПК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Феттвайс А. Волновые цифровые фильтры: теория и применение. — ТИИЭР, 1985, № 2.
2. Reekie M., Mavor J., Denyer P. Realisation of a Switched-Capacitor Voltage Wave pseudobandpass filter.—Electronics Letters, 1984, № 21.

3. Kleine U. Design of Wave-SC Filters using Building Blocks.—IEEE Trans. Circuit Theory and Application, 1984, № 12.

4. Вайдянотхан П., Митра С. Цифровые фильтры с низкой чувствительностью в полосе пропускания: обобщенный подход и алгоритмы синтеза. — ТИИЭР, 1984, № 4.

5. Григорьев А.И. Реализация низкочувствительных фильтров с переключаемыми конденсаторами. — Оптимизация режимов работы систем электроприводов/ Сб. научн. трудов. Красноярск, 1989.

6. Аллен Ф., Санчес-Синансио Э. Электронные схемы с переключаемыми конденсаторами: Пер. с англ./Под ред. В.И.Капустяна. — М.: Радио и связь, 1989.

7. Капустян В.И., Букашкин С.А., Денисов В.С. Оптимизация структур активных фильтров высокого порядка. — Радиотехника, 1988, № 11.

[09.01.92]

**Авторы:** Даничев Александр Михайлович окончил электромеханический факультет Красноярского политехнического института (КПИ) в 1978 г. В 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка алгоритмов и программ проектирования частотно-избирательных цепей с переключаемыми конденсаторами» в Московском энергетическом институте (МЭИ). Доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» КПИ.

Касьянов Александр Иванович окончил факультет автоматики и вычислительной техники КПИ в 1987 г. В 1992 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Синтез волновых фильтров с переключаемыми конденсаторами» в МЭИ. Старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» КПИ.

## Определение матрицы уравнений состояния электрической цепи по значениям вектора переменных состояния

КАЗАКОВ О.И.

Рассмотрена задача идентификации коэффициентов матрицы уравнений состояния по значениям переменных состояния цепи без источников. Предложено использовать для этой цели подход, применявшийся для определения матриц канонических систем уравнений установившихся режимов.

В статье рассмотрен матричный метод определения матрицы уравнений состояния линейной электрической цепи по измеренным значениям свободной составляющей вектора переменных состояния в нескольких равномерно расположенных на временной оси точках. Метод может быть использован как для контроля и диагностирования реальной схемы, так и для решения задачи синтеза цепи по ее исходным внешним характеристикам.

Традиционным методом анализа электрических и электронных схем является метод переменных

*The problem of identification of matrix coefficients of state equations by state variable values for the passive circuit is considered. To achieve this the approach used to identify matrices of conventional equation systems for DC regimes is suggested.*

состояния [1], в котором системы уравнений, записанных для токов и напряжений по законам Кирхгофа, и компонентных уравнений элементов сводятся к матричному уравнению состояния схемы, имеющему для линейных схем без источников тока и напряжения следующий вид:

$$\frac{dx}{dt} = Ax, \text{ с начальными условиями } x(0), \quad (1)$$

где  $x(t)$  — вектор переменных состояния (токов катушек индуктивности и напряжений конденса-

торов) размерностью  $n$ ;  $A$  — квадратная гибридная матрица схемы размерностью  $n \times n$ , характеризующая поведение схемы относительно переменных состояния.

В частном случае, если в цепи нет катушек индуктивности, то  $x(t)$  — вектор потенциалов конденсаторов, а гибридная матрица определяется узловыми матрицами проводимостей резисторов  $G$  и емкостей конденсаторов  $C$ :

$$A = -C^{-1}G. \quad (2)$$

Аналогично, если в цепи нет конденсаторов, то  $x(t)$  — вектор независимых токов катушек индуктивностей, а гибридная матрица определяется контурными матрицами сопротивления резисторов  $R$  и индуктивностей катушек  $L$ :

$$A = -L^{-1}R. \quad (3)$$

К уравнению (1) может быть сведена система уравнений, составленная по расширенному методу узловых потенциалов, который является наиболее приспособленным к расчетам на ЭВМ методом [2].

Решение матричного дифференциального уравнения  $n$ -го порядка, записанного в нормальной форме (1) с известными начальными условиями (задача Коши), формально может быть записано в виде матричной экспоненты [3]:

$$x(t) = \exp(At)x(0). \quad (4)$$

Пусть измеряются значения вектора переменных состояния  $x(t)$  в эквидистантные моменты времени  $t=hk$ , где  $k=\overline{1,n}$ . Обозначим  $x[k]=x(hk)$  и  $H=\exp(Ah)$ , тогда справедлива рекуррентная формула

$$x[k] = Hx[k-1], \quad k=\overline{1,n}. \quad (5)$$

Запишем (5) в матричном виде:

$$x_2 = Hx_1, \quad (6)$$

где  $x_1=(x[0], x[1], \dots, x[n-1])$ ;  $x_2=(x[1], x[2], \dots, x[n])$  — квадратные матрицы размерностью  $n \times n$ .

При условии невырожденности матрицы  $x_1$  из (6) можно получить матрицу  $H$ :

$$H = x_2 x_1^{-1}. \quad (7)$$

Известно, что каждую невырожденную матрицу можно представить в виде матричной экспоненты [3], поэтому из  $H$  формально можно получить  $A$ :

$$A = \frac{1}{h} \ln(H). \quad (8)$$

Это и есть решение задачи определения гибридной матрицы по значениям свободной составляющей в общем виде.

В принципе для получения решения (8) можно воспользоваться разложением логарифма в бесконечный ряд, однако практически целесообразно не надеяться на быструю сходимость ряда, а искать

решение на основе теории интерполяционных многочленов минимальной степени, определенных на спектре матрицы [4].

Используя интерполяционный многочлен Лагранжа—Сильвестра для логарифма, получаем:

$$\ln(H) = \sum_{k=1}^q (B_{k1} \ln(\lambda_k) + \sum_{s=2}^{m_q} B_{ks} (-1)^s (s-2)! \lambda_k^{1-s}), \quad (9)$$

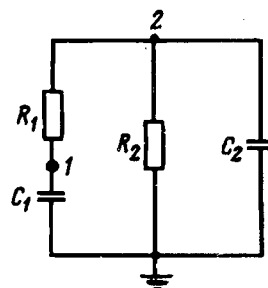
где  $\lambda_k$  — собственные значения матрицы  $H$ ;  $B_{ks}$  — компоненты матрицы  $H$  (расчетные формулы для  $B_{ks}$  приведены в [5]);  $q$  — количество различных собственных значений;  $m_q$  — кратность  $q$ -го собственного значения.

Для простого спектра формула (9) существенно упрощается:

$$\ln(H) = \sum_{k=1}^n P_k \ln(\lambda_k), \quad (10)$$

где  $P_k=B_{k1}$  — проекторы матрицы  $H$ .

В качестве иллюстрации метода рассмотрим пример. На рисунке изображена  $RC$ -схема, в ко-



торой измеряются переменные состояния, соответствующие потенциалам узлов на конденсаторах. Измерения, проведенные для  $h=0,1$  мс, определили следующие значения:  $x_1[0]=1$ ,  $x_2[0]=0$ ,  $x_1[1]=0,8477$ ,  $x_2[1]=0,2735$ ,  $x_1[2]=0,7560$ ,  $x_2[2]=0,3889$ . По формуле (7) получаем матрицу

$$H = \begin{pmatrix} 0,8477 & 0,136763 \\ 0,2735 & 0,574238 \end{pmatrix},$$

для которой собственные значения и проекторы соответственно равны  $\lambda_1=0,474114$ ,  $\lambda_2=0,947824$  и

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0,211361 & -0,288707 \\ -0,577358 & 0,788639 \end{pmatrix}, P_2 = \begin{pmatrix} 0,211361 & -0,288707 \\ -0,577358 & 0,788639 \end{pmatrix}.$$

По формулам (10) и (8) получаем матрицу

$$A = \begin{pmatrix} -2000 & 2000 \\ 4000 & -6000 \end{pmatrix} \text{ с собственными значениями}$$

$$s_1 = \ln \lambda_1 / h = -7463, \quad s_2 = \ln \lambda_2 / h = -535,9.$$

Поскольку для данной схемы узловые матрицы проводимостей и емкостей в общем виде равны

$$G = \begin{pmatrix} G_1 & -G_1 \\ -G_1 & G_1+G_2 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{pmatrix},$$

то по формуле (2)

$$A = \begin{pmatrix} -G_1/C_1 & G_1/C_1 \\ G_1/C_2 & -(G_1+G_2)/C_2 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, на основе полученной матрицы  $A$  возможно формирование схемы путем выбора  $RC$ -параметров. Например, матрице  $A$  удовлетворяют следующие параметры цепи:  $R_1=50$  Ом,  $R_2=100$  Ом,  $C_1=10$  мкФ и  $C_2=5$  мкФ. Также возможно решение задачи диагностирования. Например, если элемент матрицы  $A_{22}$  выходит за пределы допустимого нормативного диапазона, то неисправен резистор  $R_2$ ; если за пределами допуска оказались элементы матрицы  $A_{12}$  и  $A_{22}$ , то неисправен конденсатор  $C_2$ . Причем пределы допуска определяются допустимым разбросом  $RLC$ -параметров элементов цепи около номинальных значений.

Поскольку для идентификации составляющей, характеризуемой собственным значением  $\lambda$ , необходимо выполнение для некоторых  $m$  ( $0 < m \leq n$ ) условия  $m h |\lambda| \sim 1$ , то диапазоны применимости метода определяются соотношениями:

$$h \max_k |\lambda_k| \sim 1, \quad n h \min_k |\lambda_k| \sim 1,$$

что ограничивает область его использования.

Расширением метода может служить его обобщение на случай  $N$  измерений, когда  $N > n$ . Для этого на основе уравнения (5) по методу наименьших квадратов формируется целевая функция, минимизация которой обеспечивает получение аппроксимированных значений матрицы  $H$ :

$$C_i(H_{i1}, H_{i2}, \dots, H_{in}) = \sum_{k=1}^N \left( \sum_{j=1}^n H_{ij} x_j[k-1] - x_i[k] \right)^2 \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Если для нахождения минимума решать систему уравнений с частными производными  $\partial C_i / \partial H_{ij} = 0$ ,  $j = \overline{1, n}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , то нетрудно получить уравнение типа (7), для которого

$$X_1 = \sum_{k=1}^N x[k-1] x^T[k-1], \quad X_2 = \sum_{k=1}^N x[k] x^T[k-1], \quad (12)$$

где  $t$  — символ транспонирования матрицы, а под произведением вектора-столбца на вектор-строку понимается внешнее произведение матриц.

В этом случае объем вычислений возрастает, но в формировании матрицы  $H$  участвуют все измеренные значения вектора свободных составляющих.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калахан Д. Методы машинного расчета электронных схем. — М.: Мир, 1970.
2. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. — М.: Радио и связь, 1988.
3. Беллман Р. Введение в теорию матриц. — М.: Наука, 1976.
4. Ланкастер П. Теория матриц. — М.: Наука, 1982.
5. Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. — М.: Высшая школа, 1988.

[12.05.92]

Автор: Казаков Олег Игоревич в 1984 г. окончил факультет гидравлики и систем управления Московского автомобильно-дорожного института. Директор фирмы «ОЛЕГ» (Москва).

## Моделирование термошумовых индуктивных преобразователей для измерения температур металлов

БЯЛИК О.М., ДОНИЙ А.Н., АЛЕКСЕЕВ В.Ю.

Предложена математическая модель термошумового индуктивного преобразователя для измерения температуры цилиндрического тела при равномерном распределении температуры по его радиусу. Катушка колебательного контура преобразователя коаксиально охватывает объект измерений. Модель позволяет оценить чувствительность и динамический диапазон преобразователя.

Для контроля параметров и управления технологическими процессами при производстве металлических изделий требуется измерение температуры в поверхностных и приповерхностных слоях металлических расплавов или обрабатываемых изделий. Для этих целей предложен термошумовой

The mathematical model of thermal noise inductive converters for measuring temperature of a cylindrical body with uniform radial temperature distribution is proposed. The coil of the oscillatory circuit of the converter embraces coaxially the object under measurement. The model allows to evaluate the sensitivity and the dynamic range of the converter.

преобразователь с индуктивной связью [1]. Конструктивно такой измерительный прибор представляет собой высокочастотный колебательный контур, магнитно связанный с исследуемым металлом, и преобразователь напряжения шума, наводимого в контуре, осуществляющий квадратич-

ное усреднение. Передаточная функция термошумового индуктивного преобразователя нелинейным образом связана с параметрами измерительного устройства и может быть определена экспериментально. Однако такой способ нахождения передаточной функции нельзя считать оптимальным, так как он исключает возможность проектирования измерительной системы исходя из заданного динамического диапазона и чувствительности устройства. Полную информацию о системе можно получить при помощи математической модели термошумового преобразователя.

В статье предлагается математическая модель термошумового индуктивного датчика для измерения температуры цилиндрического тела при равномерном распределении температуры по его радиусу. Катушка колебательного контура коаксиально охватывает объект измерений.

При наличии гальванической связи измерительной цепи с объектом измерений результирующее значение информативного параметра  $\bar{U}^2$ , получаемое преобразователем, описывается соотношением Найквиста—Джонсона:

$$\bar{U}^2 = 4kT_s r_s \Delta f; \quad (1)$$

где  $\bar{U}^2$  — средний квадрат напряжения шума;  $k$  — константа Больцмана;  $T_s$  — абсолютная температура объекта;  $r_s$  — электрическое сопротивление объекта;  $\Delta f$  — полоса частот, в которой осуществляется преобразование.

Замена гальванической связи магнитной приводит к трансформации теплового шума объекта измерений связанной системой контуров, один из которых образован индуктивностью и сопротивлением потерь металлического цилиндра, а другой является измерительным контуром преобразователя (рис. 1). В этом случае средний квадрат напряжения шума находится путем решения уравнений контурных токов для эквивалентной схемы, представленной на рисунке. Тепловой шум

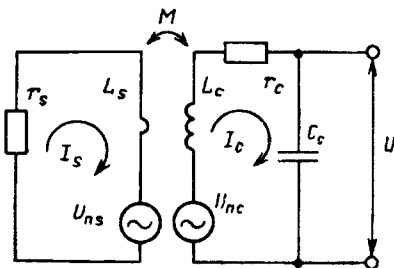


Рис. 1. Эквивалентная схема термошумового индуктивного преобразователя

объекта измерений сосредоточен на схеме в генераторе напряжения  $U_{ns}$ , шум контура — соответственно в  $U_{nc}$ :

$$U_{ns} = R_{11} I_s - j\omega M I_c; \quad (2)$$

$$U_{nc} = -j\omega M I_s + R_{22} I_c, \quad (3)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ;  $I_s$  — поверхностный ток в образце;  $I_c$  — ток измерительного контура;  $M$  — величина магнитной связи между контурами;  $\omega$  — резонансная частота измерительного контура;  $R_{11}$  — полное сопротивление образца;

$$R_{11} = r_s + j\omega L_s; \quad (4)$$

$R_{22}$  — полное сопротивление измерительного контура;

$$R_{22} = r_c + j\omega L_c - j/\omega C_c; \quad (5)$$

$r_s, L_s$  — сопротивление потерь и индуктивность образца;  $r_c, L_c, C_c$  — сопротивление потерь, индуктивность и емкость измерительного контура соответственно.

Из уравнений (2), (3) определяются контурный ток  $I_c$  и, далее, напряжение на конденсаторе  $U_c$ :

$$U_c = -j/(\omega C_c) I_c = \frac{U_{ns} M - j U_{nc} R_{11} / \omega}{C_c (R_{11} R_{22} - \omega^2 M^2)^2}. \quad (6)$$

Средний квадрат напряжения  $U_c$  находим с учетом того, что  $U_{ns}$  и  $U_{nc}$  — некоррелированные случайные процессы:

$$\bar{U}^2 = \frac{\bar{U}_{ns}^2 M^2 - \bar{U}_{nc}^2 R_{11}^2 / \omega^2}{C_c^2 (R_{11} R_{22} - \omega^2 M^2)^2}. \quad (7)$$

Замена переменных в выражении (7) позволяет получить компактную форму записи напряжения на выходе термошумового преобразователя:

$$U = C_1 (C_2 T_s - C_3), \quad (8)$$

где  $U$  — постоянный уровень на выходе устройства;

$$C_1 = 4k\Delta f / \{C_c 2[r_c r_s - \omega^2 L_c L_s (1 + k_l^2)] + j(\omega r_c r_s L_c + \omega r_c L_s - r_c / \omega C_c)\}; \quad (9)$$

$$C_2 = k_l^2 L_c L_s r_s; \quad (10)$$

$$C_3 = r_c (r_s^2 / \omega^2 - L_s^2 + j 2 r_s L_s / \omega); \quad (11)$$

$k_l$  — коэффициент магнитной связи измерительного контура с объектом;

$$K_l = M / \sqrt{L_c L_s}. \quad (12)$$

Сопротивление потерь  $r_s$  и индуктивность  $L_s$  металлического цилиндра определяются как компоненты его полного внутреннего сопротивления  $Z_s$ ;

$$Z_s = P_\Sigma / I_m^2, \quad (13)$$

$P_\Sigma$  — мощность потерь в образце;

$$P_\Sigma = -\frac{1}{2} \int_V \sigma_s \dot{E}_m \dot{E}_m^* dv - j \frac{\omega}{2} \int_V \mu \dot{H}_m \dot{H}_m^* dv; \quad (14)$$

$I_m$  — полный ток в образце;

$$I_m = \int_0^{R_0} J_m ds; \quad (15)$$

$\sigma_s, \mu$  — проводимость и магнитная проницаемость материала образца;  $J_m$  — плотность вихревых токов в образце;  $R_0$  — радиус образца.

После несложных преобразований [2] выражение (13) принимает следующий вид:

$$Z_s = \frac{\pi \omega \mu \int_0^{R_0} M_1^2 [(\omega \mu \sigma_s)^{1/2} R] R dR + j \int_0^{R_0} M_0^2 [(\omega \mu \sigma_s)^{1/2} R] R dR}{l_0 (1 - \text{ber}[(\omega \mu \sigma_s)^{1/2} R_0])^2 + \text{bei}^2[(\omega \mu \sigma_s)^{1/2} R_0]}, \quad (16)$$

где  $l_0$  — длина образца;  $\text{ber}$ ,  $\text{bei}$  — функции Кельвина нулевого порядка;  $M_0, M_1$  — модели функций Кельвина нулевого и первого порядков.

Из соотношения (16) могут быть получены значения  $r_s$  и  $L_s$ :

$$r_s = \frac{\pi \omega \mu}{l_0} \frac{\int_0^{R_0} M_1^2 [(\omega \mu \sigma_s)^{1/2} R] R dR}{(1 - \text{ber}[(\omega \mu \sigma_s)^{1/2} R_0])^2 + \text{bei}^2[(\omega \mu \sigma_s)^{1/2} R_0]}; \quad (17)$$

$$L_s = \frac{\pi \mu}{l_0} \frac{\int_0^{R_0} M_0^2 [(\omega \mu \sigma_s)^{1/2} R] R dR}{(1 - \text{ber}[(\omega \mu \sigma_s)^{1/2} R_0])^2 + \text{bei}^2[(\omega \mu \sigma_s)^{1/2} R_0]}. \quad (18)$$

Зависимость величины  $\sigma_s$  от абсолютной температуры образца [3] аппроксимируем функцией вида  $1/\sum_{i=0}^3 a_i T^i$ . Коэффициенты  $a_i$  для чистого алюминия

приведены в таблице, где температурный интервал разбит на два поддиапазона: выше и ниже точки плавления.

$i$	$a_i$ при $T < 933,61$ К	$a_i$ при $T > 933,61$ К
0	$-1,0821507118789 \cdot 10^{-8}$	$3,47056222601306 \cdot 10^{-8}$
1	$1,46380738167991 \cdot 10^{-10}$	$3,03406032733250 \cdot 10^{-10}$
2	$-8,00462046309290 \cdot 10^{-14}$	$-9,70209757663964 \cdot 10^{-14}$
3	$6,06666819873672 \cdot 10^{-17}$	$1,76295469055019 \cdot 10^{-17}$

С помощью выражений (8)—(11), (17), (18) и аппроксимированной зависимости  $\sigma_s(T)$  рассчитываем отклик системы  $U$  на заданное воздействие  $T_s$ . (Как следует из [4] градиентом температур по сечению исследуемого образца в этом случае можно пренебречь.) Результаты расчетов при значениях параметров системы:  $R_0 = 5$  мм,  $l_0 = 30$  мм,  $L_c = 100$  мкГн,  $\Delta f = 200$  кГц,  $r_c = 0,3$  Ом,  $k_l = 0,03$  представлены на рис. 2.

Приведенные графические зависимости позволяют оценить чувствительность и динамический диапазон изменения информативного параметра устройства  $U$  при заданных характеристиках системы. Так, на частотах 1, 2, 3, 4 МГц (толщина скин-слоя 0,18; 0,13; 0,11; 0,09 мм) динамический

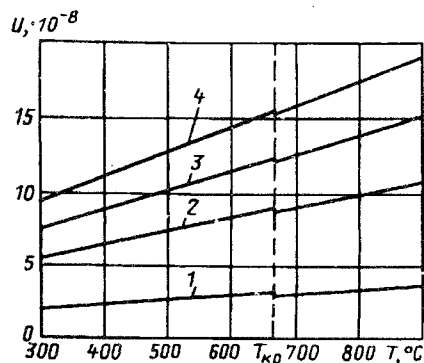


Рис. 2. Уровень на выходе термозумового преобразователя при различных значениях частоты настройки контура: 1, 2, 3, 4 — соответственно 1, 2, 3, 4 МГц

диапазон преобразователя составляет  $1,9 \cdot 10^{-8}$ ;  $4,1 \cdot 10^{-8}$ ;  $6,4 \cdot 10^{-8}$ ;  $8,7 \cdot 10^{-8}$  В соответственно. Нелинейность характеристики не превышает 3%.

Таким образом, представленная в статье математическая модель термозумового преобразователя позволяет оценить чувствительность и динамический диапазон, рассчитать передаточную характеристику, а также параметры системы при заданном температурном воздействии на входе и требуемом отклике на выходе и может быть использована при проектировании устройств дистанционного измерения температур поверхностных слоев металлических тел цилиндрической формы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение термозумового метода для бесконтактного измерения температур расплавов / О.М.Бялик, А.Н.Доний, В.Ю.Алексеев, В.В.Тихонов — НТК «Повышение эффективности литейного производства». — Л., 1990.
2. Доний А.Н., Алексеев В.Ю. Расчет сопротивления потерь и индуктивности металлического цилиндра в продольном магнитном поле. — Электричество, 1992, № 1.
3. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. — М.: Металлургия, 1989.
4. Бялик О.М., Доний А.Н., Алексеев В.Ю. Переменное магнитное поле в проводящем цилиндре с нелинейным распределением температуры по радиусу. — Электричество, 1991, № 9.

[08.10.92]

**Авторы:** Бялик Олег Михайлович окончил инженерно-физический факультет Киевского политехнического института (КПИ) в 1964 г. В 1984 г. защитил докторскую диссертацию в АН УССР, посвященную некоторым проблемам литейного производства. Зав. кафедрой металловедения, оборудования и технологии термической обработки металлов КПИ.

Доний Александр Николаевич окончил радиофизический факультет Киевского государственного университета в 1978 г. В 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию по проблемам литейного производства в КПИ. Зав. сектором кафедры металловедения, оборудования и технологии термической обработки металлов КПИ.

Алексеев Владислав Юрьевич окончил радиофизический факультет КПИ в 1989 г. Аспирант кафедры металловедения, оборудования и технологии термической обработки металлов КПИ.



## К 200-летию выхода в России первого руководства по электрическим экспериментам

ХАСАПОВ Б.Г.

Раздел «Электричество» в российские учебники физики вошел впервые во второй половине XVIII столетия. Как известно, первым учебником физики на русском языке считается «Волфианская экспериментальная физика», вышедшая первым изданием при Санктпетербургской Академии наук в 1746 г. в переводе М.В. Ломоносова. При подготовке второго издания в 1760 г. во многом уже устаревшего учебника Ломоносов сделал к нему ряд добавлений, одно из которых впервые вводило учащегося в совершенно новую область человеческих знаний. Шестое по счету добавление называлось «О(б) электрической силе», где помимо краткого описания известных в то время свойств электричества, автор отсылал читателя к более полным своим работам в этой области [1].

К концу XVIII века в России вышел ряд переводных книг со сравнительно большими разделами, посвященными электричеству, среди которых в первую очередь необходимо назвать учебник И.Х. Эркслебена, предназначавшийся «для употребления при Горном училище» в Санкт-Петербурге под названием «Начальные основания естественной науки с дополнениями Г.К. Лихтенберга» (1789), и московское издание книги П. Мушенброка «Сокращение опытной физики» (1791) [2, 3]. Написанные учеными первой величины, эти учебники были на достаточно высоком уровне своего времени, но это были учебники физики вообще и электричество занимало в них достаточно скромное место.

В 1793 г. в Москве типографией Христофора Клаудия печатается книга, посвященная только этому разделу физики. Приведем название книги полностью: «Электрические опыты, любопытства и удивления достойные. С относительными ко врачеванию параличных и других болезней наставлениями; основательным расположением коих теория и практика сей науки объясняются. Сочиненные английским Королевским Механиком Георгом Адамсом. С немецкого на российский переложенные Т.О., изданные и многими другими сведениями и увеселительными опытами дополненные артиллерии штык-юнкером и математики партикулярным учителем Ефимом Войтахов-

ским» [4]. Эта книга и стала первым руководством по электрическим экспериментам на русском языке. Напомним, что термин «экспериментальная наука» определялся в то время как «наука о всем том, что чрез опыты познать можно» [1, т.1, с.426]. Издание не предназначалось конкретно для каких-либо учебных заведений или подготовки специалистов определенного профиля, а являлось хорошей научно-популярной работой для широкого круга лиц, интересующихся новой экзотической и модной в свете наукой.

Прежде чем попасть на стол переводчика, книга Адамса неоднократно переиздавалась. Вышедшая в свет в 1784 г. в Лондоне, она получила весьма широкое распространение в Европе. В Англии к 1792 г. она вышла уже четвертым изданием на английском языке, а в переводе Иоганна Гехлера на немецком в Лейпциге (1785) и в Вене (1786), а затем, как видим, и в России, в переводе с немецкого. Заметим, однако, что в оригинале книга Г.Адамса имела более точное для ее содержания название: «Очерки об электричестве, объясняющие законы этой полезной науки...» [5].

В чем же секрет успеха книги Георга Адамса? Ведь Адамс был вовсе не ученым, а механиком, создателем и изготовителем физических приборов, известных в России как «Воздушный Адамсов насос», «Микроскоп Адамсов», «Адамсов медный планетариум» и, конечно, электрических машин, известных во всей Европе [6]. Никаких новых электрических явлений он не открывает, а добросовестно описывает опыты и мнения других исследователей, что, впрочем, он и не скрывает. «Дабы предупредить читателя в названии меня переписчиком чужих сочинений. — пишет он в предисловии, — то я охотно признаюсь, что ... заимствовал я из различных сочинений, до моего предмета относящихся, и с великим удовольствием выбрал из них все то, что к намерению моему найтись могло» (Курсив наш. — Б.Х.)

Какие у него были намерения?

Путем занимательных опытов, поставленных в определенной последовательности, сообщить обучающимся основные известные ему

проявления электричества. Каждый опыт комментировался теоретической предпосылкой или делались заключения. Короче говоря, в книге Адамс проявляет себя как незаурядный педагог и популяризатор знаний об электричестве. Здесь и прыгающие куколки, и светящаяся вода, и различные вертящиеся колеса, и подражание северному сиянию и т.д. Всего более 200 опытов. Но цель была одна: «Старался я в сих опытах, существенные части электричества собрав, расположить кратко и порядочно (в определенном порядке — Б.Х.), дабы связь оных легко, приятно и вразумительно вступающему (начинающему — Б.Х.) представить». И, действительно, после прочтения книги с производством опытов у читателя должно сложиться полное представление о пондеромоторных, тепловых, световых, химических (!), физиологических проявлениях электричества. Есть даже упоминание об электромагнитном (!) действии электричества, которое предстоит еще открыть через более чем четверть века Эрстеду. Приведем описание этого опыта, который задаст еще много загадок историкам науки: «Опыт 127. Разряжение батареи, проведенное через стальную стрелку (когда заряд бывает силен), оную намагничивает» [4, с. 115]. Впрочем этот феномен известен многим исследователям того времени, но, в силу сложившихся неправильных представлений о причинах этого явления в науке того времени, прогресс изучения его был приостановлен на десятилетия [15, с. 309].

Опыты, описываемые Адамсом, сослужили добрую службу в развитии техники. Они давали пищу для размышлений зарождавшейся тогда технической интеллигенции и изобретателям. Поджигание при помощи электрической искры «горючего воздуха» (гремучий газ) в игрушечном пистолете подтолкнуло изобретательскую мысль к проектам первых двигателей внутреннего сгорания с электрическим зажиганием уже в 1799 г.! А опыты с макетами жилых домов и кораблей с молниеотводами демонстрировали целесообразность широкого применения грозозащиты.

В книге автор много внимания уделяет и атмосферному электричеству, здесь можно встретить описание даже такого редкого явления, как шаровая молния. Так что просветительская роль книги Адамса была довольно высока.

Однако Адамс не ставил своей задачей описание подробностей конструкций существующих в то время электрических машин (точнее, электростатических генераторов) и приборов. В Европе их можно было свободно купить, да и фабриканту, производящему такие машины, вероятно, это было невыгодно. «Я желаю здесь

описать одни только те машины, которые ныне везде в употреблении» [4, с.18]. В России же электрических машин, бывших «везде в употреблении», еще не было. Электрическими опытами, за редкими исключениями, занималась только наука, в то время как в Европе электрическую машину можно было встретить и в суде, и у врача, и даже при королевском дворе. Только в 1796 г. в дневниках энтузиаста внедрения в практику электричества в России А.Т.Болотова встречается запись «об электрическом лечении, входящем в моду» [7]. Поэтому издатель книги на русском языке, чтобы достичь результатов, предложенных Адамсом, должен был дать некоторые комментарии и описание приборов и машин, которые мог бы сделать читатель в условиях жизни в России. Об этом издатель пишет в своем «предуведомлении». Прочитруем часть этого предисловия, как имеющую большой интерес для истории отечественной электротехники.

«Приверженность моя к предлагаемой здесь части физики и усердное рвение сообщить почтенной публике любопытное сведение о чудесной электрической силе, всегда были для меня сильным побуждением к сочинению сего рода книги; не произвестъ в действие не допускали меня известные мои, пред сим изданные в свет сочинения. Ныне ж один из моих приятелей доставил мне перевод с немецкого языка сей издаваемой мной книги, знаменитого сочинителя Г.Адамса; почему оставя начатый мной труд, за лучшее почел я исправить сей перевод по возможности знания моего и прибавить в конце сей книги нечто от себя (Курсив наш. — Б.Х.). Вследствие сего я описал подробное строение трех родов электрических машин и открыл легчайшие способы относительно к различным опытным приготовлениям, с приобщением к тому многих других опытов».

Как следует из «предуведомления», автор его сам уже начал писать подобного рода книгу, но передумал и, прокомментировав и дополнив книгу Адамса, издал ее (рис. 1). Комментарии разбросаны по всему тексту книги, а дополнения составляют 55 из 355 страниц текста всей книги. Что же добавил издатель в книгу? «Хотя Г.Адамс, — пишет он, — и описывает здесь электрическую машину, но поелику описание его недостаточно, то оставя здесь подлинный его смысл, я... предложил Вам, благосклонный читатель, мое собственное полное и подробное различных машин описание» [4, с. 19].

В прибавление составителя вошло описание не только электрических машин, но и лейденских банок, кондукторов, грозозащитных сооружений, а также ряд опытов, в том числе и оригинальных,

# ЭЛЕКТРИЧЕСКІЕ ОПЫТЫ, ЛЮБОПЫТСТВА И УДИВЛЕНІЯ

достойныя.

Съ относительными ко врачеванію параличскихъ  
и другихъ болѣзней наставленіями;

Основательнымъ расположеніемъ коихъ теоріи  
и практика сей науки объясняются.

СОЧИНЕННЫЕ

Англинокииъ Королевскимъ Механикомъ  
Георгомъ Адамсомъ.

съ Нѣмецкаго на Россійской языкъ переложенныя

Т. О.

ИЗДАНЫ

и многими другими сѣденіями и увеселительными  
опытами допоянныя

Артиллеріи Штыкъ-Юнкеромъ и Математи-  
ки партикулярнымъ Учителемъ

Ефимомъ Войтаховскимъ.

Съ 7-ю рисунками.

Съ указнаго дозволенія.



ВЪ МОСКВѢ.

Печатаны иждивеніемъ Издателя въ Волной Ти-  
пографіи, у Христофора Клаудія.

1793 года.

Рис. 1. Титульный лист первого руководства  
по электрическим экспериментам в России

ником ранее не описанных. В связи с тем, что описание большинства конструкций того времени имеется в работе В.Л.Ченакала «Электрические машины в России XVIII века» [8, с. 50—111], рассмотрим отмеченную составителем машину, характеристики которой отсутствуют в данной работе, но заслуживают упоминания. Тем более что из текста следует, что сам автор при опытах пользуется такого типа машиной.

На деревянной раме, составленной из брусков длиной 36 дюймов (около 1 м), установлены четыре стойки, в которых легко вращаются на железных осях два пустотелых деревянных валика диаметром 4—6 дюймов (100—150 мм). С краев к валикам крепятся деревянные реборды, а сами поверхности валиков обклеиваются фланелью. На валики в виде транспортерной ленты накладываются и сшиваются отрезки так называемой вошанки — ткани, пропитанной воском, род клеенки. К концу оси одного из валиков привинчивается рукоятка, которой валик и лента приводятся во вращение. Получение электрических зарядов производится путем натирания вошанки дощечками, укрепленными посередине машины, с наклеенными на них заячьими шкурками. Съём зарядов производится специальным «отводом», установленным на стеклянных ножках в середине рамы с помощью металлических спиц, касающихся полотна (рис. 2).

«Таким образом устроенная машина при обращении рукояткою вала, трением об шерсть вошанки, производит довольно сильное отрица-

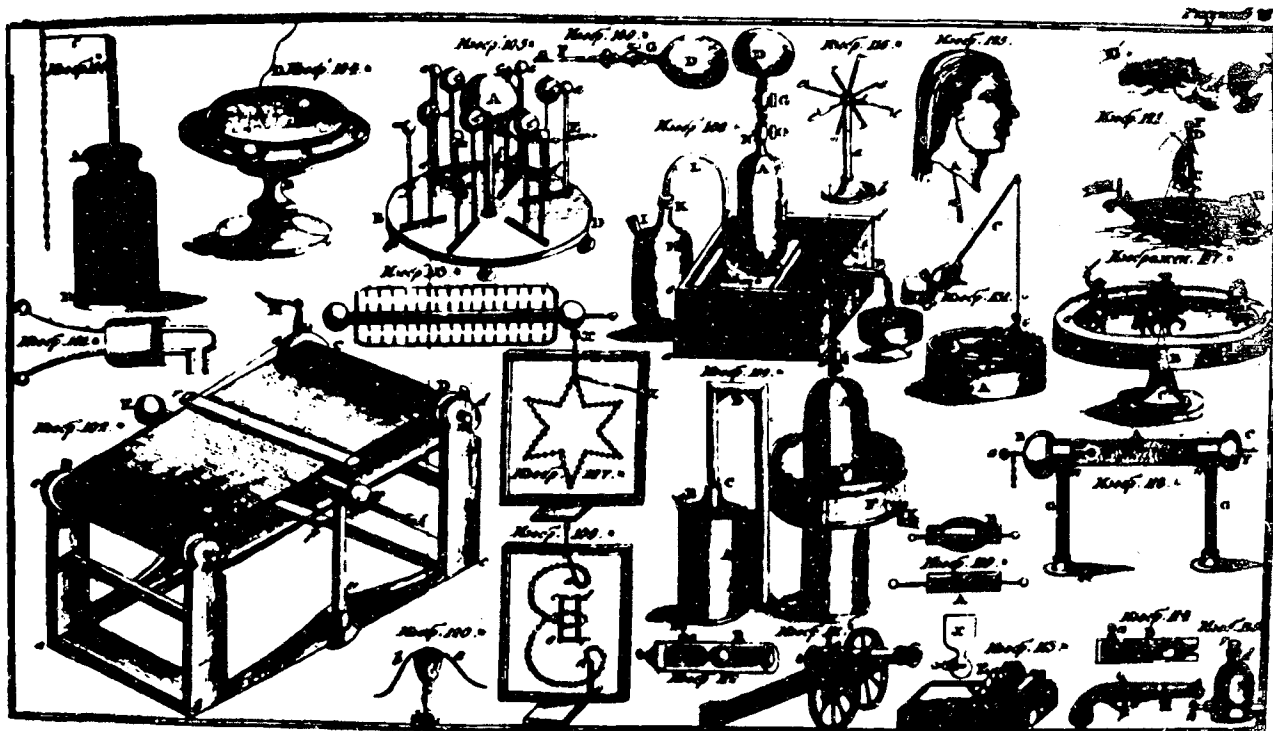


Рис. 2. Электрическая машина, использованная Е.Д.Войтаховским — прообраз генератора Ван-де-Граафа

тельное электричество. Сооружение сей машины несравненно дешевле прежних» [4, с. 317].

Эта очень простая и дешевая машина могла быть не только легко изготовлена в условиях России, но и конструкция ее оказалась весьма перспективной. Основные узлы ее явились прообразом ныне известного ленточного электростатического генератора Ван-де-Граафа [19, с. 146]. В качестве изобретателя данной конструкции в книге указан некий г. Роланд. (Скорее всего, это М.Роуланд из Амстердама [2, с. 118].)

Кто же все-таки являлся издателем этой книги и, несомненно, ее соавтором?

На титульном листе указано — Ефим Войтяховский.

Войтяховские — это старинный русский дворянский род, родоначальником которого был Александр Войтяховский, витебский шляхтич, в 1655 г. принявший русское подданство и вступивший в русскую службу. Сын его Лука был пожалован в 1662 г. поместьем в Смоленской губернии. Здесь же и родился правнук Луки Ефим Дмитриевич Войтяховский — издатель и соавтор данной книги. К сожалению, об авторе одного из первых учебников в России по электричеству известно очень мало. Можно лишь приблизительно назвать даты его рождения и смерти: 1742—1812 гг.

После двадцатидвухлетней службы в армии в Артиллерийском корпусе он ушел в отставку в чине штык-юнкера и занялся частной преподавательской деятельностью — открыл в Москве в 1784 г. Математическую школу. Благодаря этому в 1791 г. он начал обучать математике и естественным наукам наследников царского престола, сыновей императора Павла I Александра и Константина. Заметим, что сам Павел I обучался у выдающегося ученого того времени физика Ф.У.Т.Эпинуса, оставившего заметный след в развитии науки об электричестве [16]. При обучении своих сыновей император «обращал преимущественное внимание на их успехи по математике и оказывал особенное расположение преподавателю этого предмета Войтяховскому, которого он награждал со свойственной ему щедростью» [10, с.24].

Как педагог Ефим Дмитриевич в то время был широко известен. Он являлся автором «Полного курса чистой математики» в 5 томах, неоднократно переиздававшегося и известного еще во времена А.С.Пушкина. Среди его учебников и «Полная наука военного укрепления или фортификация», выходившая также несколькими изданиями [11, с. 367].

Службой в Артиллерийском корпусе, который при императрице Екатерине II занимался организацией фейерверков и «увеселительных ог-

ней», видно, и объясняется интерес Войтяховского к электричеству. К тому же в то время возникло понимание необходимости создания надежной системы молниезащиты пороховых складов.

Среди описаний его опытов можно встретить и «электрическим огнем сияющее имя Государя» и железную проволоку, сжигаемую от электрической искры, где уже совсем недалеко до создания в России первого в мире электрического запала П.Л.Шиллинга и практического применения его в Крымской войне академиком Б.С.Якоби. Есть опыты, которые интересовали Войтяховского как фортификатора и инженера: «Пропущением электрического удара вздутая глина» или «Кораблик электрической силой сокрушенный» и т.д.

Впрочем, какими бы наивными ни казались с нынешней точки зрения опыты Войтяховского, они были одними из первых оригинальных опытов с электричеством прикладного характера, описанных на русском языке.

Искреннее удивление вызывает тот факт, что среди четырех десятков цитируемых и упоминаемых Г.Адамсом ученых и их работ в области электричества нет имен российских академиков, внесших значительный вклад в развитие этого раздела науки: Г.В.Рихмана, М.В.Ломоносова, Ф.У.Т.Эпинуса [17, с.207—359; 18, т. 3, с.15—179]. Это чисто теоретические работы в области физики атмосферного электричества, теория электрического потенциала и др., а также создание конкретных конструкций — электрометра, воздушного конденсатора и т.д. Впрочем, королевский механик Г.Адамс мог и не знать о них. Но почему Е.Д. Войтяховский не упоминает о них ни единым словом? Ведь не мог же он не знать об опытах М.В.Ломоносова и Г.В.Рихмана с атмосферным электричеством и трагической гибели последнего?

Трудно ответить на этот вопрос. Может быть он боялся информировать отечественного читателя о судьбе Рихмана и тем самым вызывать страх при проведении опытов у читателя? Этого в свое время боялся и М.В.Ломоносов [19, с. 204—206]. Ведь упоминая о работах российских ученых, невозможно было умолчать о смерти Г.В.Рихмана.

Весьма колоритен список особ, «благоволивших подписаться» на это издание, благодаря чему можно знать, кого же в Москве интересовали в то время электрические опыты. Здесь и высшая московская знать: княгиня Куракина, князья Волконские, Хованский; хорошо знакомы старинные дворянские фамилии Нарышкиных, Новиковых, Шереметевых, Толстых. Есть отец А.Н.Радищева. Большая группа офицеров, а также землемеры, аптекари и купцы. Экзотически выглядит фа-

■ мия архимандрита Петропавловского монастыря в Глухове Значко-Яворского.

Издание Войтяховского не было забыто и в XIX веке. Оно упоминается как литературный источник в диссертации В.Д.Телепнева на соискание ученой степени магистра в Московском университете в 1818 г. [12, с. 11].

Конец жизни Е.Д.Войтяховский провел в селе Кудиново Орловской губернии, где он выстроил себе дом и продолжал заниматься наукой. Вот что пишет в воспоминаниях о его последних днях бывший ученик Ефима Дмитриевича помещик Левшин: «Была жизнь весьма скромной и в 70 лет кончил жизнь, тоскуя о несчастье своем: единственный сын его Федор Ефимович не был к нему почтителен и мотал шибко. По праву наследства, сын завладел имением и года в два промотал и умер в бедности. Он погребен на общем кладбище в селе Лунёво. Исчезло все, как большей частью все исчезает: о Войтяховском все забыли, редко кто о нем что знает. Имение его разошлось по рукам наследников, — не осталось ничего теперь и помянуть некому!» [13].

Ну что ж, выполним эту задачу и назовем Е.Д.Войтяховского не только автором учебников по математике и фортификации, но и одним из первых энтузиастов и популяризаторов науки об электричестве в нашей стране, одним из авторов первой книги по электричеству на русском языке.

Есть еще одна загадка. Фамилия переводчика зашифрована инициалами Т.О. Чья личность скрывается под этой аббревиатурой? Это немало важно знать, изучая становление и развитие отечественной электротехнической терминологии.

В предисловии Войтяховский называет переводчика своим другом, и имя его известно даже больше в истории науки, чем имя Войтяховского. Это математик, преподаватель Московского Народного училища, впоследствии профессор математики в Харьковском университете, а затем его ректор — Тимофей Федорович Осиповский. Фигура весьма значительная в истории отечественной математики. Известны его работы также по механике, оптике, астрономии. Есть и работа в затронутой нами теме: «О разделении электричества в разобщенных отводах при держании перед ними в некотором удалении наэлектризованного тела» (1817 г.) [14].

Книга Г.Адамса и Е.Д.Войтяховского имела счастливую судьбу. Невзирая на то, что библиофильская практика не признает за редкость все сочинения по части математики, техники,

медицины, естествознания и не собирает их, число сохранившихся экземпляров сочинения, вероятно, сравнительно велико. Еще недавно можно было видеть их на прилавках букинистических магазинов Москвы. А ведь с момента издания прошло уже 200 (!) лет. Видно, книга была нужна читателям и поэтому сохранилась.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волфианская экспериментальная физика с немецкого подлинника на латинском языке сокращенная, с которого на русский язык перевел Михайло Ломоносов. — В кн.: Ломоносов, ПСС, т. 1, 1950, т. 3, 1952. — М.—Л.: Изд-во АН СССР.
2. Еркслебен И.Х. Начальные основания естественной науки. С дополнениями Г.К.Лихтенберга. — СПб, 1789.
3. Мушенбрук П. Сокращение опытной физики. — М., 1791.
4. Адамс Г. Электрические опыты, любопытства и удивления достойные... — М., 1793.
5. Adams G. An Essay on electricity explaining the principles of that useful science... — London, 1784.
6. Двигубский И. Список инструментов физического кабинета... — В кн.: А.Ф.Кононов. История физики в Московском университете. — М.: Изд-во МГУ, 1955.
7. Болотов А.Т. Памятник протекших времен, или краткие исторические записки о бывших происшествиях и о носившихся в народе слухах. — В кн.: Записки очевидца. — М.: Современник, 1989.
8. Ченакал В.Л. Электрические машины в России XVIII века. — В кн.: Труды института истории естествознания и техники. Т. 43. История физико-математических наук. — М.: Изд-во АН СССР, 1961.
9. Тэнессеку Ф., Крамарюк Р. Электростатика в технике. — М.: Энергия, 1980.
10. Карнович Е.П. Цесаревич Константин Павлович. Биографический очерк. — СПб, 1899.
11. Мельникова Н.Н. Издания, напечатанные в типографии Московского университета. XVIII век. — М.: Изд-во МГУ, 1966.
12. Телепнев В. Рассуждение о способах возбуждения электричества в телах. — М., 1818.
13. Левшин Н.Г. Домашний памятник. — Русская старина, 1873, т. 8, № 12.
14. Прудников В.Е. Русские педагоги-математики XVIII—XIX веков. — М.: Учпедгиз, 1956.
15. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики с древнейших времен до конца XVIII века. — М.: Наука, 1974.
16. Эпинус Ф.У.Т. Теория электричества и магнетизма. — М.: Изд-во АН СССР, 1951.
17. Рихман Г.В. Труды по физике. — М.: Изд-во АН СССР, 1956.
18. Ломоносов М.В. ПСС в 10 томах. — М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1950—1957.
19. Елисеев А.А. Возникновение науки об электричестве в России. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960.

[15.02.93]

Автор: Хасанов Борис Георгиевич окончил Ростовский-на-Дону институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Тепловозы и тепловозное хозяйство» в 1958 г. Метролог локомотивного депо «Новороссийск».

## **I Международная конференция по электромеханике и электротехнологии (МКЭЭ-94)**

Конференция, организуемая Московским энергетическим институтом, Академией электротехнических наук и Симферопольским государственным университетом, состоится в сентябре 1994 г. в Суздале (Россия). Цель конференции — возможность обмена результатами работ по проблемам электромеханики и электротехнологии между учеными России и стран ближнего и дальнего зарубежья.

### **Председатель конференции**

академик Пешков И.Б.

### **Сопредседатель конференции**

профессор Филиков В.А.

### **Председатель оргкомитета**

профессор Ильинский Н.Ф.

### **Международный научный комитет**

Проф. Ильинский Н.Ф. (Россия)

Проф. Розанов Ю.К. (Россия)

Проф. Верещагин И.П. (Россия)

Проф. Недков И. (Болгария)

Проф. Лин Либин (Китай)

Проф. Липо (США)

Проф. Счастливый Г.Г. (Украина)

Акад. Данилевич Я.Б. (Россия)

Акад. Пешков И.Б. (Россия)

Проф. Филиков В.А. (Россия)

Проф. Диван Д. (США)

Проф. Максимюк Дж. (Польша)

Проф. Бауэр Г.Х. (Германия)

### **Темы конференции (секции)**

1. Материалы и компоненты в электротехнике
2. Электромеханические системы и устройства
3. Силовая электроника
4. Электротехнологии
5. Экология в электротехнике
6. Подготовка и повышение квалификации инженеров-электротехников

Авторам докладов необходимо представить в оргкомитет название и тезисы в объеме 500 символов до 20 января 1994 г. Всем авторам, тезисы докладов которых будут приняты, высылаются правила оформления докладов для трудов конференции. Полный текст доклада должен быть представлен в оргкомитет не позднее 1 мая 1994 г.

Труды конференции будут опубликованы непосредственно по завершении конференции. Рабочими языками конференции являются русский и английский. Будет обеспечен синхронный перевод.

В культурной программе — поездки по городам «Золотого кольца России».

За дополнительной информацией просьба обращаться к сопредседателю конференции.

### **Адрес и реквизиты для связи**

105835 Москва, Красноказарменная, 14, Московский энергетический институт, проф. Филиков В.А.

Телефон: (095) 362—78—58, 362—71—05

Факс: (095) 362—17—25

Телекс: 411610 MEI

E-mail: POST MASTER MEI MSK. SU

---

### **Поправка**

В «Электричестве» 1993, № 5 опубликована статья «Динамика синхронной машины кратковременного действия...» (с. 26—33). Автором статьи, помимо указанных в журнале Груздева А.Ю. и Саблина А.Д., следует считать Ходжаева К.Ш.

# Игорь Алексеевич Глебов

(К 80-летию со дня рождения)

21 января 1994 г. исполнилось 80 лет выдающемуся русскому ученому, специалисту в области энергетики и электротехники, действительному члену Российской Академии наук, доктору технических наук, профессору Игорю Алексеевичу Глебову.

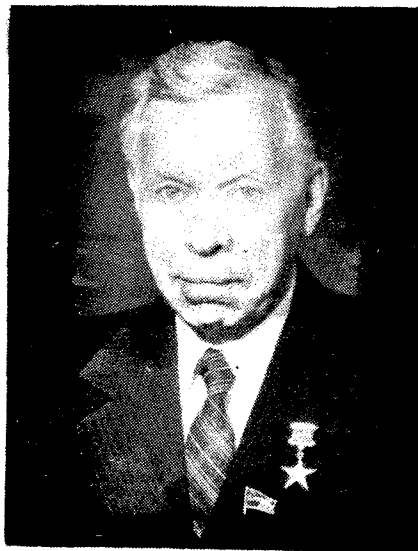
И.А.Глебов трудовую деятельность начал электромонтером. После окончания в 1938 г. Ленинградского политехнического института год работал инженером, а затем с 1938 по 1941 гг. обучался в аспирантуре ЛПИ.

С первых дней Великой Отечественной войны по 1946 г. И.А.Глебов находился на действительной военной службе. Он — активный участник боевых действий в составе Волховского, Юго-Западного, 1,3 и 4 Украинских фронтов. За успешное выполнение заданий командования и проявленную при этом личную храбрость И.А.Глебов награжден орденами Отечественной войны I степени, Красного Знамени, Красной Звезды и Александра Невского.

В 1964 г. защитил диссертацию на ученую степень доктора технических наук, в 1966 г. ему присвоено ученое звание профессора. С 1973 г. И.А.Глебов — директор ВНИИэлектромаш, в 1974 г. избран членом-корреспондентом, а в 1976 г. — действительным членом Академии наук СССР. В 1978—1989 гг. был членом Президиума АН СССР, в настоящее время — советник Президиума Российской Академии наук. И.А.Глебов является Почетным действительным членом Российской инженерной академии.

И.А.Глебовым выполнены фундаментальные исследования полупроводниковых преобразователей совместно с электромашинными системами, на основе которых созданы высокоэффективные системы возбуждения мощных генераторов, получившие широкое международное признание. Исследования сложных переходных режимов в энергосистемах обеспечили создание совершенных систем регулирования турбо- и гидрогенераторов.

Будучи научным руководителем международной програм-



мы по созданию перспективной серии турбогенераторов стран СЭВ, И.А.Глебов внес существенный вклад в организацию международного сотрудничества. При его активном участии коллективами отечественных и зарубежных специалистов создана не имеющая аналогов единая унифицированная серия турбогенераторов, которая внедрена как у нас в стране, так и за рубежом.

Велики заслуги И.А.Глебова в практическом использовании явления сверхпроводимости. На основе большого комплекса исследований под руководством и при непосредственном участии И.А.Глебова создан первый опытно-промышленный сверхпроводниковый турбогенератор 20 МВ·А, сверхпроводниковые униполярные машины различного исполнения, топологические генераторы, уникальные магнитные системы.

Академик И.А.Глебов уделяет много внимания созданию оборудования для термоядерного синтеза. Под его руководством созданы инерционные накопители энергии на  $10^9$  Дж.

В последние годы И.А.Глебов ведет активную научную работу по определению направлений и прогнозированию фундаментального и прикладного развития электротехники и электрофизики, по выявлению тенден-

ций и разработке стратегии развития энергетики России и ее отдельных регионов, по налаживанию связей с учеными-энергетиками стран СНГ.

Академик И.А.Глебов ведет большую научно-общественную работу. В течение 10 лет (1979—1989 гг.) он избирался депутатом Верховного Совета СССР и вел работу в качестве председателя комиссии по науке и технике Совета Союза Верховного Совета СССР. Он — член бюро Отделения физико-технических проблем энергетики РАН, президент Союза научных и инженерных обществ Санкт-Петербурга, Почетный президент Санкт-Петербургской инженерной академии.

Академик И.А.Глебов ведет активную работу по укреплению международных связей. За участие в строительстве Асуанской ГЭС награжден орденом «Отличия» первой степени Объединенной Арабской Республики. В 1968 г. избирался Президентом научно-исследовательского комитета «Вращающиеся электрические машины» Международной конференции по крупным электрическим системам (СИГРЭ), полномочия которого исполнял в течение 8 лет. Был руководителем научного направления по сверхпроводимости в СИГРЭ. Является руководителем работ по созданию единой серии турбогенераторов стран, входивших в СЭВ. Он — действительный член американского Института инженеров по электротехнике и электронике (с 1974 г.).

Игорь Алексеевич — лауреат Государственной премии СССР, Герой Социалистического Труда, награжден орденами и медалями СССР; ему присуждена премия АН СССР имени П.Н.Яблочкова, международная премия имени Карпинского (ФРГ).

Друзья и товарищи, коллеги по работе желают Игорю Алексеевичу новых творческих успехов, доброго здоровья и счастья!

Группа товарищей и учеников,  
редколлегия журнала «Электричество»

## Вячеслав Иванович Гордеев

Российская наука понесла тяжелую утрату. Безвременно, на 53 году жизни, скончался профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий и городов Новочеркасского политехнического института Вячеслав Иванович Гордеев.

В.И. Гордеев родился 15 июня 1940 г. В 1963 г. с отличием окончил НПИ и начал работать ассистентом кафедры электротехники этого института. В 1965—1968 гг. учился в аспирантуре Ростовского института инженеров железнодорожного транспорта под руководством проф. Г.М.Каялова. В 1968—1972 гг. Вячеслав Иванович вновь работает в НПИ ассистентом и старшим преподавателем кафедры электропривода, в 1969 г. защищает кандидатскую диссертацию. В 1972—1974 гг. преподает в Гвинейском политехническом институте в г. Конакри. В 1975 г. возвращается в родной институт и работает до конца жизни на кафедре электроснабжения промышленных предприятий и городов; с 1979 г. — доцентом, с 1983 г. — заведующим кафедрой. Занимаясь актуальными проблемами регулирования максимума нагрузки промышленных электрических сетей, В.И. Гордеев в 1988 г. защитил докторскую диссертацию, в 1990 г. получил уче-



ное звание профессора. Докторская диссертация Вячеслава Ивановича имеет прямой выход в учебный процесс. На ее основе создана оригинальная учебная дисциплина, написаны соответствующие учебные пособия, выпущена монография.

Настоящий ученый, Вячеслав Иванович пристально следил за потребностями производства. Им разработаны теория и практика регулирования электропотребления, оптимизация распределения лимитов мощности при нечеткой исходной информации и другие актуальнейшие проблемы взаимодействия электрической системы и

потребителя.

Вячеслав Иванович много и плодотворно работал над созданием и внедрением новой техники.

Человек редкой работоспособности и большого личного обаяния, он активно участвовал в работе советов факультета и института, советов по защите докторских и кандидатских диссертаций, в редколлегии журнала «Электромеханика», одновременно блестяще решал десятки дел, поддерживал творческие связи со многими учеными Ростова, Москвы, Киева, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Улан-Удэ, Мариуполя, Донецка и других городов СНГ. Часто выступал оппонентом и способствовал своей объективной и глубокой оценкой успешным защитами диссертаций. Вячеслав Иванович гармонично сочетал научную и педагогическую деятельность, его знала и высоко ценила вузовская общественность.

Ушел из жизни в самом расцвете видный ученый и педагог, талантливый организатор, человек незаурядных способностей.

Добрая память о Вячеславе Ивановиче Гордееве надолго сохранится в сердцах его многочисленных учеников, друзей, коллег.

Группа товарищей и учеников



# Подготовка рукописей для журнала «Электричество»

1. Материал статьи должен быть изложен в строгой и вместе с тем понятной форме для широкого круга научных работников и инженеров. В частности, необходимо пояснить все малоизвестные термины и понятия. Надо помнить, что читателя прежде всего интересует физический смысл рассматриваемых явлений.

Если в статье сообщаются новые разработки (научных и технических проблем), то должны быть показаны их технико-экономические преимущества по сравнению с ранее известными. При изложении новых методов расчетов, исследований и т.п. необходимо давать их сравнительную оценку (по отношению к известным способам) с точки зрения их простоты и затрат времени на изучение и пользование ими.

Для того чтобы облегчить работу читателя с журналом, авторам необходимо придерживаться следующей структуры статей:

а) краткое изложение состояния рассматриваемого вопроса и постановки задачи, решаемой в статье;

б) метод решения задачи и принятые допущения;

в) основное содержание статьи — физическая сущность, исходные и конечные математические выражения, эксперименты и расчеты, примеры, иллюстрации;

г) обсуждение полученных результатов и сопоставление с известными ранее;

д) выводы и рекомендации;

е) приложения: доказательства использованных в статье положений; математические выкладки и преобразования;

ж) список литературы.

2. При написании статьи необходимо избегать применения громоздкого математического аппарата. Сведения, приводимые в статье, должны содержать лишь самый минимум формул.

3. Статья представляется в двух экземплярах (первый и второй), отпечатанных через два интервала с полями 4 — 5 см.

4. Формулы вписываются темными чернилами в отдельных строках, а не в тексте.

В том случае, если прописные и строчные буквы имеют одинаковое начертание, прописные буквы рекомендуется подчеркивать двумя чертами снизу, строчные — двумя чертами сверху. Греческие буквы следует заключать в кружок красным карандашом.

При вписывании индексов следует указывать, какие из них латинские и какие русские.

5. Библиографический указатель (список литературы) составляется в порядке последовательности ссылок в тексте, при этом указываются:

а) для журнальных статей — фамилия и инициалы автора, название статьи, наименование журнала или сборника, год издания, том, номер, страницы;

б) для книг — фамилия и инициалы автора или всех авторов, название книги, наименование издательства и город, в котором оно находится, год издания, число страниц в книге.

Названия иностранных работ, а также фамилии их авторов должны быть приведены в оригинальной транскрипции и напечатаны на машинке.

В список литературы не следует включать неопубликованные материалы, а также материалы, отпечатанные литографическим и подобным ему способами.

6. Рисунки не должны содержать лишних данных, а все обозначения на рисунках должны соответствовать стандарту. Поясняющие надписи следует по возможности выносить в подпись к рисунку, причем они должны дополнять текст статьи и не повторять его.

Цифровые или буквенные обозначения, имеющиеся на рисунках, необходимо объяснять либо только в подписи к рисунку, либо только в тексте.

Следует учитывать, что при печати рисунки уменьшаются, поэтому детали их не должны быть мелкими, однако размер каждого рисунка не должен превышать 20×30 см.

Фотоснимки должны быть отпечатаны на глянцевой бумаге. Изображение должно быть контрастным, с резкой проработкой деталей. На одном экземпляре осциллограмм не должно держаться никаких надписей.

Рисунки и фотоснимки не следует вклеивать в текст статьи; на обороте каждого из них необходимо указывать фамилию автора.

7. В таблицах все наименования следует указывать полностью, не сокращая слов.

8. В конце статьи должны быть указаны сведения об авторе(ах):

а) какой факультет, какого вуза и когда закончил;

б) когда получил ученую степень, где и по какой тематике была защита;

в) место настоящей работы и должность;

г) адрес и номера домашнего и служебного телефонов.

9. Необходимо представить краткую аннотацию статьи на русском и английском (включая название статьи) языках.

## СОДЕРЖАНИЕ

Бут Д.А. Синтез автономных электроэнергетических систем. . . . .	1
Бондаренко А.Ф., Комаров А.Н., Машанский А.М., Портной М.Г. Регулирование частоты и перетоков мощности при параллельной работе энергообъединений России, Восточной и Западной Европы. . . . .	18
Меламед А.М., Скрипко О.А. Применение принципов экспертных систем для прогнозирования электропотребления. . . . .	26
Надточий В.М. Психологические аспекты построения экспертных систем. . . . .	31
Александров Г.Н., Евдокунин Г.А. Применение на линиях ограничителей междуфазовых и фазовых перенапряжений. . . . .	34
Афанасьев А.А., Воробьев А.Н. Расчет магнитного поля магнитоэлектрического вентильного двигателя методом сопряжения конформных отображений. . . . .	40
Беркович Е.И. Об аналогиях в решениях потоковых задач и задач расчета резистивных цепей. . . . .	49
Боев С.Г., Лопаткин С.А. Накопление заряда в полиэтилене низкой плотности в сильных электрических полях. . . . .	56
Даничев А.М., Касьянов А.И. Синтез волновых фильтров с переключаемыми конденсаторами. . . . .	63
Казakov О.И. Определение матрицы уравнений состояния электрической цепи по значениям вектора переменных состояний. . . . .	66
Бялик О.М., Доний А.Н., Алексеев В.Ю. Моделирование термощумовых индуктивных преобразователей для измерения температур металлов. . . . .	68
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ . . . . .	71
ХРОНИКА . . . . .	76

## CONTENTS

Bout D.A. Synthesis of Autonomous Electrical Power Systems. . . . .	1
Bondarenko A.F., Komarov A.N., Mashanskii A.M., Portnoi M.G. The Frequency and Tie-Line Power Control under the Parallel Operation of the Interconnected Power Systems of Russia and Eastern and Western Europe. . . . .	18
Melamed A.M., Skripko O.A. Electrical Load Forecasting Using System Principles. . . . .	26
Nadtochii V.M. Psychological Aspects of the Development of Expert Systems. . . . .	31
Aleksandrov G.N., Evdokunin G.A. The Utilization of MOA on the Lines for Limitation Phase-to-Phase and Phase-to-Ground Overvoltages . . . . .	34
Afanas'ev A.A., Vorob'ev A.N. Calculation of Magnetic Field of Magnetolectric Converter-fed Motor Using Conformal Mapping Conjugation Method. . . . .	40
Berkovich E.I. On Analogies in Solutions of Flux Problems and Problems of Resistive Circuits Calculation. . . . .	49
Boev S.G., Lopatkin S.A. Accumulation of Charge in Low Density Polyethylene in High Electrical Fields. . . . .	56
Danichev A.M., Kas'yanov A.I. The New Method of Synthesis of Wave Filters with Commutable Condensers. . . . .	63
Kazakov O.I. Identification of Electric Circuit Hybrid Matrix Using State Variables Vector Values. . . . .	66
Byalik O.M., Donii A.N., Alekseev V.Yu. Modelling of Thermal Noise Inductive Converters for Measuring Temperatures of Metals. . . . .	68
FROM THE HISTORY OF ELECTRICAL ENGINEERING . . . . .	71
CHRONICLE . . . . .	76

## УДОБНО И БЕЗОПАСНО!

Предлагаем переносную установку для уборки воды. Производительность установки — до 3,5 м<sup>3</sup>/ч. Слой воды, остающийся на полу после уборки в самом глубоком месте, — не более 3 мм. Установка в обращении подобна пылесосу, не боится присосов воздуха, грязи в воде (твердые частицы размером до 1 см). Незаменима для безопасного ведения работ в резервуарах, колодцах и т.д., обеспечивая непрерывную откачку поступающих вод. Потребляемая мощность — 400 Вт, масса — 15 кг.

Бесплатно высылаются описание и условия получения.

Запросы направляйте по адресу:

216532 г. Десногорск Смоленской обл., а/я 45/2, НПП «ЭКСПО—ЛАД».

---

Адреса редакции: 103012 Москва, К-12, Б.Черкасский пер., 2/10

☎ 924-24-80

101000 Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648

---

Художественный редактор Т. А. Дворецкова

---

Сдано в набор 29.11.93. Подписано в печать 28.12.93. Формат 60×881/8.  
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,8 Тираж 860 экз. Заказ 296

---

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.  
Макет выполнен АО «Знак», 115547, Москва, Михневский пр-д, 4  
Отпечатано в ТОО НПФ «Агат»  
119048, Москва, ул. Доватора, д. 12, корп. 2