

ISSN 0013-5380

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1994

8

## **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 — **Макаршин 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 и технической политики России), **Костенко М.В.** (Санкт-Петербургский государственный технический университет), **Лизунов С.Д.** (Московский электрозвод), **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 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

# Автоматизированный анализ послеаварийных режимов электроэнергетических систем

ПОНОМАРЕНКО И.С., УССАМА ДАКАК

Предложен алгоритм автоматизированного определения экстремальных послеаварийных режимов электроэнергетических систем. Относительно анализируемого элемента определяются послеаварийные состояния, в которых его токовая загрузка максимальна. Основан на целенаправленном ограниченном переборе таких состояний и специальных алгоритмах ускоренных пересчетов режимов с использованием линейной модели сети. Реализован в виде комплекса программ, апробированных на различных тестовых схемах.

The paper presents computer aided procedure for the determination of extreme post fault electrical power system operating conditions. The post fault states with maximum current load of analysed elements are found. The algorithm is based on linear network model and uses limited purposeful sorting out of such states. The developed programs have been checked on different test systems.

Оценка наиболее тяжелых послеаварийных режимов необходима при решении ряда задач проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС) [1–3]. При этом рассматриваются критичные по току, напряжению или мощности параметры режимов элементов электрической сети. Такие оценки актуальны, например, для формирования советов диспетчеру по надежному ведению режимов, при определении расчетных нагрузок элементов сети, для правильной настройки средств противоаварийной автоматики и т.д. Значения параметров в послеаварийных режимах находятся путем проведения ограниченной серии расчетов установившихся режимов при различных возмущениях, что не позволяет гарантировать полную достоверность получаемых результатов.

Эта задача может быть решена созданием системы автоматизированного анализа послеаварийных режимов ЭЭС, которая позволит повысить

достоверность принимаемых решений. При этом рассматривается случай отключения одного или двух любых элементов анализируемой сети. Одновременное отключение большего числа элементов не рассматривается как маловероятное.

Предлагаемый алгоритм и комплекс программ решения данной задачи основан на целенаправленном переборе послеаварийных состояний. Используется линейная модель сети в комплексном виде с применением матриц обобщенных параметров, позволяющих реализовать приближенные, но достаточно точные алгоритмы ускоренных расчетов параметров режимов, обладающие высоким быстродействием.

Расчет исходного нормального доаварийного режима сети выполняется один раз любым способом, например на основе непосредственного решения узлового уравнения сети в общем виде по выражению

$$\dot{I} = \dot{C}\dot{J} + \dot{Y}_{\text{c},\text{R}}\dot{E}, \quad (1)$$

где  $I, j, E$  — столбцовые матрицы токов ветвей,

задающих токов узлов и свободных ЭДС ветвей;  $C, Y_{c,b}$  — матрицы коэффициентов распределения токов и собственных и взаимных проводимостей.

Расчеты всех остальных послеаварийных режимов с отключением элементов сети выполняются на основе рассчитанного исходного режима. Вследствие принятой линейной модели сети может быть использован метод наложения, позволяющий получить достаточно точное и быстрое решение.

Алгоритм пересчета параметров режима при отключении одной ветви в схеме зависит от того, является ли данная ветвь элементом контурной группы (ЭКГ), либо одноэлементным сечением (ОС). Под контурной группой понимается определенное подмножество ветвей графа, через две любые ветви которого можно привести замкнутый контур. Отключение одной ветви ЭКГ с точки зрения изменения режима остальных элементов сети эквивалентно включению в отключаемую ветвь дополнительной ЭДС, вызывающей в данной ветви дополнительный ток, равный по значению току этой ветви в доаварийном режиме, но противоположный по знаку. При отключении  $r$ -й ветви значение этой ЭДС равно

$$\Delta \dot{E}_r = -\dot{I}_r / y_{rr}, \quad (2)$$

где  $\dot{I}_r$  — ток  $r$ -й ветви в исходном режиме;  $y_{rr}$  — диагональный  $r$ -й элемент матрицы.

Тогда послеаварийный ток любой другой ветви схемы можно определить в соответствии с (2) в виде

$$\dot{I}'_i = \dot{I}_i + \dot{y}_{i,r} \Delta \dot{E}_r. \quad (3)$$

Здесь  $\dot{I}_i$  — исходный ток ветви  $i$ ;  $\dot{I}'_i$  — то же после отключения ветви  $r$ ;  $\dot{y}_{i,r}$  — элемент матрицы  $Y_{c,b}$ .

Если отключенная ветвь является ОС, т.е. такой ветвью, через которую на графике сети нельзя привести ни один замкнутый контур, тогда расчет режима оставшейся части сети выполняется иначе. Под оставшейся частью схемы в этом случае понимаются те ее элементы, связанные которых с источником питания (ИП) или балансирующим узлом при отключении ветви ОС не нарушается. Тогда для этой оставшейся части схемы режим с отключенной ветвью ОС эквивалентен режиму исходной схемы, в котором ток этой ветви равен нулю. Этот режим можно получить, включив в конечный от ИП узел  $k_r$ , между которыми находится отключаемая  $r$ -я ветвь, задающий ток, равный току отключаемой ветви в доаварийном режиме и противоположный по знаку:

$$\Delta \dot{J}_{k_r} = -\dot{I}_r. \quad (4)$$

Послеаварийный ток любой  $i$ -й ветви в ос-

тавшейся после отключения  $r$ -й ветви части схемы в соответствии с (1) определяется

$$\dot{I}'_i = \dot{I}_i + \dot{C}_{i,k_r} \Delta \dot{J}_{k_r}, \quad (5)$$

где  $\dot{C}_{i,k_r}$  — элемент матрицы  $\dot{C}$ .

Рассмотрим одновременное отключение двух ветвей схемы. Наиболее простой случай, если отключаются две взаимно независимых по токам ветви — ОС (т.е. отключение одной ветви не приводит к нарушению связности с ИП другой). Отключение двух взаимно зависимых сечений рассматривать не имеет смысла, так как оно сводится к случаю отключения одной ветви — ОС, расположенной ближе к ИП. Вследствие взаимной зависимости сечений расчет режима элементов оставшейся части сети сводится к двум независимым пересчетам исходного режима в соответствии с (5). При одновременном отключении ветвей ОС  $r$  и  $l$  параметры режима оставшейся части можно определить в виде:

$$\dot{I}'_i = \dot{I}_i + \dot{C}_{i,k_r} \Delta \dot{J}_{k_r} + \dot{C}_{i,k_l} \Delta \dot{J}_{k_l}. \quad (6)$$

Несколько более сложный случай при одновременном отключении ветви — ЭКГ и ветви — ОС. Так как отключение ветви ОС приводит к изменению тока в контурной группе, расчет необходимо выполнять в два этапа в определенной последовательности. На первом шаге определяется изменение режима анализируемого элемента  $i$ , а также отключаемой ветви  $r$ , входящей в контурную группу при отключении сечения  $l$ :

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}'_i &= \dot{I}_i + \dot{C}_{i,k_l} \Delta \dot{J}_{k_l}; \\ \dot{I}'_r &= \dot{I}_r + \dot{C}_{r,k_l} \Delta \dot{J}_{k_l}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Следующим шагом в соответствии с (3) определяются окончательные параметры режима элемента  $i$  при отключении ветвей  $r$  и  $l$ :

$$\dot{I}''_i = \dot{I}'_i + \dot{y}_{i,r} \Delta \dot{E}'_r, \quad (8)$$

где

$$\Delta \dot{E}'_r = -\dot{I}'_r / y_{rr}. \quad (9)$$

При отключении одновременно двух ветвей, входящих в одну контурную группу, возможно два варианта:

связность сети сохраняется;  
происходит нарушение связности.

В первом случае, если отключаемые ветви входят в одну КГ, они взаимосвязаны по режиму. Это значит, что при отключении одной из них немедленно изменяется режим другой. Поэтому моделирование одновременного отключения двух таких ветвей ( $r$  и  $l$ ) может осуществляться одновременно включением в эти ветви двух фиктивных ЭДС, делающих равными нулю токи этих ветвей. Математически это можно выразить уравнением:

$$\begin{aligned} \dot{y}_{r,r} \Delta \dot{E}_r + \dot{y}_{l,l} \Delta \dot{E}_l &= -\dot{I}_r; \\ \dot{y}_{l,r} \Delta \dot{E}_r + \dot{y}_{l,l} \Delta \dot{E}_l &= -\dot{I}_l. \end{aligned} \quad (10)$$

Решая это линейное уравнение можно определить искомые ЭДС  $\Delta E_r$  и  $\Delta E_l$  ветвей  $r$  и  $l$ . Тогда послеаварийные параметры режима остальных элементов сети определяются в виде

$$\dot{I}'_i = \dot{I}_i + \dot{y}_{i,r} \Delta \dot{E}_r + \dot{y}_{i,l} \Delta \dot{E}_l. \quad (11)$$

Наиболее сложным является последний вариант, когда при отключении двух ветвей—ЭКГ связность сети нарушается. Следует отметить, что по существу он совпадает со случаем отключения узла, входящего в контурную группу. Отличие состоит в том, что к узлу могут подходить (быть ему инцидентными) больше двух ветвей, по которым необходимо провести его отделение от остальной части схемы. Поэтому рассмотрим решение этой задачи в общем виде, изображенном на рис. 1. Вся сеть условно разбита на две подсистемы  $C_1$  и  $C_2$ , связанные между собой произвольным числом  $r, l, \dots, g$  связей. Подсистема  $C_1$  соединена с ИП. Подсистема  $C_2$  может включать в себя некоторую совокупность элементов сети или один узел. Моделируется режим одновременного отключения элементов  $r, l, \dots, g$  и отделение подсистемы  $C_2$  от подсистемы  $C_1$  и

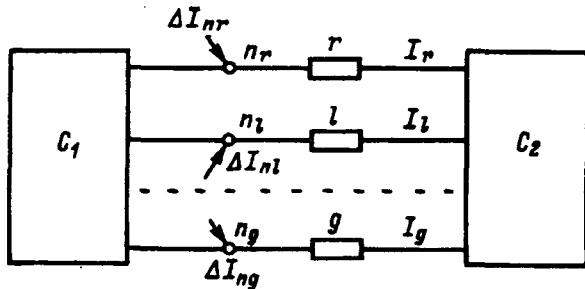


Рис. 1. Схема моделирования отключения группы элементов при потере связности сети

соответственно от ИП.

В таком состоянии токи от подсистемы  $C_1$  к узлам  $n_r, n_l, \dots, n_g$  должны быть равны нулю. Этого можно добиться, включив в указанные узлы некоторые фиктивные задающие токи, которые были бы равны послеаварийным токам в связующих элементах, что выражается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{J}_{k_r} &= \dot{I}'_r; \\ \Delta \dot{J}_{n_l} &= \dot{I}'_l; \\ \dots &\dots \\ \Delta \dot{J}_{n_g} &= \dot{I}'_g. \end{aligned} \quad (12)$$

Тогда для каждой из этих ветвей для исходного и послеаварийного режимов можно записать следующие системы уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{I}'_r &= \sum \dot{c}_{r,j} J_j; \\ \dot{I}'_l &= \sum \dot{c}_{l,j} J_j; \\ \dots &\dots \\ \dot{I}'_g &= \sum \dot{c}_{g,j} J_j; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}'_r &= \sum \dot{c}_{r,j} J_j + \dot{c}_{r,n_r} \Delta J_{n_r} + \dot{c}_{r,n_l} \Delta J_{n_l} + \dots + \dot{c}_{r,n_g} \Delta J_{n_g}; \\ \dot{I}'_l &= \sum \dot{c}_{l,j} J_j + \dot{c}_{l,n_l} \Delta J_{n_l} + \dot{c}_{l,n_r} \Delta J_{n_r} + \dots + \dot{c}_{l,n_g} \Delta J_{n_g}; \\ \dots &\dots \\ \dot{I}'_g &= \sum \dot{c}_{g,j} J_j + \dot{c}_{g,n_l} \Delta J_{n_l} + \dot{c}_{g,n_r} \Delta J_{n_r} + \dots + \dot{c}_{g,n_g} \Delta J_{n_g}. \end{aligned} \quad (14)$$

Вычитая из (13) почленно (14) и подставляя (12), получим:

$$\begin{aligned} (-1 + \dot{c}_{r,n_r}) \Delta J_{n_r} + \dot{c}_{r,n_l} \Delta J_{n_l} + \dots + \dot{c}_{r,n_g} \Delta J_{n_g} &= -\dot{I}'_r; \\ \dot{c}_{l,n_r} \Delta J_{n_r} + (1 + \dot{c}_{l,n_l}) \Delta J_{n_l} + \dots + \dot{c}_{l,n_g} \Delta J_{n_g} &= -\dot{I}'_l; \\ \dots &\dots \\ \dot{c}_{g,n_r} \Delta J_{n_r} + \dot{c}_{g,n_l} \Delta J_{n_l} + \dots + (-1 + \dot{c}_{g,n_g}) \Delta J_{n_g} &= -\dot{I}'_g. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, получим систему линейных уравнений, решив которую, можно определить искомые фиктивные задающие токи  $\Delta J_{n_r}, \Delta J_{n_l}, \dots, \Delta J_{n_g}$ , моделирующие отключение подсистемы  $C_2$ . Тогда для любой  $i$ -й ветви подсистемы  $C_1$  новый режим после отключения подсистемы  $C_2$  может быть определен в виде

$$\dot{I}'_i = \dot{I}_i + \dot{c}_{i,n_g} \Delta J_{n_g} + \dot{c}_{i,n_l} \Delta J_{n_l} + \dots + \dot{c}_{i,n_r} \Delta J_{n_r}. \quad (16)$$

Это выражение позволяет достаточно просто и быстро пересчитать режим любого элемента оставшейся части схемы при одновременном отключении двух ветвей—ЭКГ, приводящих к потере связности в сети, либо при отключении любого узла.

Алгоритм пересчета режима сети зависит от того, является ли отключаемая ветвь (ветви) ОС или ЭКГ. В связи с этим возникает необходимость быстрого автоматического определения принадлежности любой ветви к ОС или определенной КГ.

Задача определения одноэлементных (в том числе) сечений на графе сети была поставлена и частично решена в теории надежности, например в [4]. Однако вследствие специфики решаемых задач определялись не все ОС на графике, а только ОС относительно некоторого анализируемого узла. В основу алгоритма определения всех ОС на графике положен метод поиска с возвратом [5], использующий дополнительное определение типовых ситуаций при прохождении графа сети для идентификации всех ОС и соответствующих узлов. В большинстве схем электрических сетей практически все ОС могут быть определены на основе распознавания таких ти-

повых ситуаций. Если все-таки ситуация прохождения не будет однозначно идентифицирована, предусмотрено проведение контрольных проверок на связность с исключенной из графа неидентифицированной ветвью, на основании чего делается заключение о ее принадлежности к ОС или нет. Так как метод поиска с возвращением работает очень быстро и мало критичен к размерности анализируемой сети, предложенный алгоритм обладает высоким быстродействием.

Для определения КГ на графике сети разработан другой оригинальный алгоритм и программа, так же основанные на методе поиска с возвращением. При этом используется информация о составе ветвей — ОС, полученная на предыдущем этапе. Поиск всех КГ осуществляется за время, необходимое для осуществления одного прохождения в глубину всего графа. Поэтому данный алгоритм также обладает высоким быстродействием и некритичен к размерности анализируемой сети.

Изложенные алгоритмы позволили создать комплекс программ оценки наиболее тяжелых послеаварийных режимов электрических систем. В качестве расчетных возмущений рассматриваются возможные отключения любой ветви схемы, любого узла схемы, либо одновременное отключение двух ветвей. Одновременное отключение большего числа элементов не учитывается, как маловероятное. Структурная схема данного алгоритма приведена на рис. 2.

Элементы из отобранной контурной группы, а также значимые по влиянию одноэлементные сечения ранжируются по степени утяжеления режима анализируемого элемента при их отключении. Наиболее значимый из них соответствует расчетному состоянию ЭЭС с одним отключенным элементом, при котором нагрузка анализируемого элемента максимальна. Наиболее влияющие элементы (имеющие максимальный ранг) выделяются в отдельную группу и для них составляется матрица взаимных влияний, каждый элемент которой характеризует увеличение нагрузки одного элемента при отключении другого. Определяются значения изменения нагрузки анализируемого элемента при различных комбинациях попарного отключения элементов, имеющих наивысший ранг (из отобранной группы) и максимальное значение соответствующих элементов матрицы взаимных влияний. Те два элемента, при отключении которых нагрузка анализируемого элемента является максимальной, соответствуют расчетному состоянию ЭЭС с двумя отключенными элементами. Для его определения требуется рассмотреть не все возможные состояния с двумя отключенными элементами ЭЭС, а только очень ограниченную их часть.

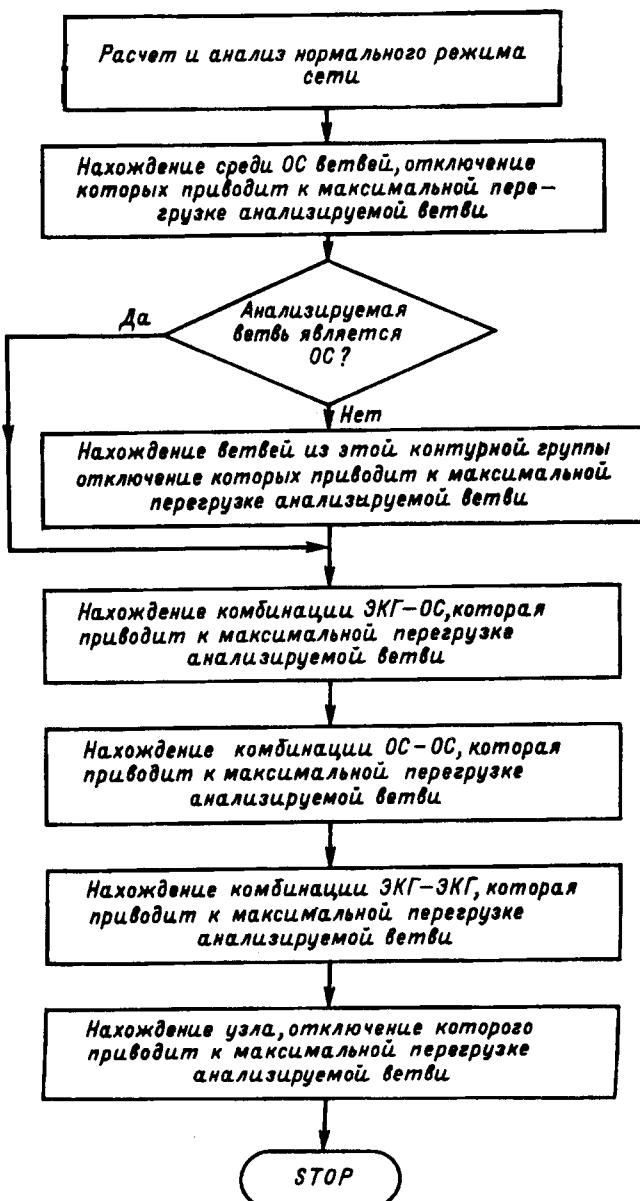


Рис. 2. Структурная схема алгоритма автоматизированного анализа послеаварийных режимов

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лисеев М.С., Елисеев В.П. Экспресс-анализ послеаварийных режимов по допустимым токам, напряжениям и мощностям. / Инф.обеспечение, задача решения реального времени в диспетчерском управлении. (Доклад сессии инф.обеспечения АСДУ ЭЭС. 1988, сентябрь, Паланга, ч. 2). — Каунас, 1989.
- El-razaz Mazi A.A., Al-Marzoog N. Automatic contingency and analysis carried with passive corrective measure for overloads in newly developing power system. — High technol. Power Ind: prociasted Int. Symp., bozeman (mont), Aug 20–22, 1986.
- Al-Kady M.A., El-Sobki M., Sinha N.K. An improved technique for automatic contingency ranking in power system control and reliability analysis. — Asm 86: Appl. Simu and modell. proc. Int. conf. Vancouver, June 4–6, 1986.
- Фокин Ю.А., Пономаренко И.С. Метод определения минимальных сечений относительно узлов нагрузки в расчетах надежности сверхсложных схем систем электроснабжения. — Изв. вузов СССР. Энергетика. 1982, № 8.
- Кристофицес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. — М.: Мир, 1978.

# Энергетическая характеристика стойкости полимерной изоляции при воздействии частичных разрядов

АРОНОВ М.А., КОКУРКИН М.П.

Энергетический параметр — удельная энергия разрушения диэлектрика — может использоваться в качестве критерия стойкости к действию поверхностных частичных разрядов. При этом учитывается то, что на разрушение единицы объема диэлектрика затрачивается лишь часть их энергии. Эта характеристика зависит только от свойств диэлектрика. Для нахождения такой характеристики требуется небольшое время, достаточное для образования измеряемого объема разрушенного диэлектрика.

Для сравнительной оценки способности диэлектриков противостоять действию частичных разрядов используют результаты испытаний их стойкости к действию поверхностных частичных разрядов (ПЧР). Эти испытания организуются таким образом, что разряды возникают в зоне тройного сопряжения (металл—воздух—диэлектрик), например, в испытательном промежутке стержень—диэлектрик—плоскость (рис. 1).

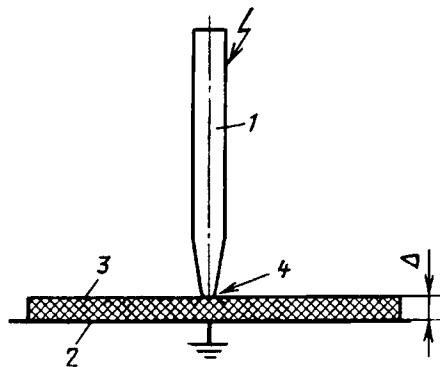


Рис. 1. Электродная система при испытаниях: 1 — потенциальный электрод, стержень с радиусом скругления конца  $R$ ; 2 — заземленная плоскость; 3 — образец для испытаний, плоский диэлектрик толщиной  $\Delta$ ; 4 — зона тройного сопряжения

Основным показателем стойкости диэлектрика к действию ПЧР является время жизни, определяемое в конкретных условиях испытаний. С целью сокращения длительности испытаний их проводят при повышенной интенсивности разрядов. Повышение интенсивности достигается путем увеличения частоты и напряжения на испытательном промежутке. Однако границы до-

The energy parameter — specific damage energy of dielectric — can be used as criterion of polymer insulation stability under surface partial discharges' influence, where only part of their energy spent to damage the volume dielectric unit is taken into account. This characteristic depends only on dielectric properties. To obtain this characteristic a short period of time is required enough for creating the damaged dielectric measured volume.

пустимого повышения интенсивности не определены. Кроме того, время жизни образцов существенно зависит не только от типа диэлектрика, но и от его размеров, формы электродов, вида напряжения и ряда других факторов. Поэтому результаты измерения времени жизни на стандартных образцах, как правило, неприемлемы при отличиях, даже небольших, условий эксплуатации и геометрии реальной изоляционной конструкции. Особенно заметно это становится там, где разряд в зоне тройного сопряжения является не следствием дефекта, а становится частью технологического процесса, как, например, в озонаторах с барьерным разрядом.

В [1—3 и др.] указывается на возможность использования в качестве критерия стойкости полимерных материалов к действию частичных разрядов энергетической характеристики — количества полной энергии частичных разрядов, расходуемого на разрушение единицы объема или массы диэлектрика. Таким критерием является коэффициент эрозии  $B_3$  [1], определенный на основе результатов измерения времени жизни различных пленочных материалов. Однако эта энергетическая характеристика обладает существенным недостатком: она не учитывает, что на разрушение материала в зависимости от условий испытаний расходуется различная доля полной энергии частичных разрядов.

В настоящей работе показано, что в качестве критерия стойкости твердой полимерной изоляции к действию ПЧР должна использоваться такая энергетическая характеристика как удельная

Авторы: Пономаренко Игорь Степанович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1976 г. В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Анализ развития каскадных аварий в ЭЭС» в МЭИ. Доцент кафедры электроэнергетических систем МЭИ.

Усаама Дакак (гражданин Сирийской Арабской Республики) окончил колледж в САР. В 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Автоматизации управления послеаварийными режимами в ЭЭС» в МЭИ.

энергия разрушения диэлектрика  $w_p$ , под которой понимается не полное, а лишь затрачиваемое на разрушение единицы объема материала количество энергии частичных разрядов. Указанная характеристика зависит только от свойств диэлектрика. При этом предлагается метод, при котором для ее получения требуется относительно небольшое время испытаний (единицы или десятки часов), достаточное для разрушения определенного объема материала диэлектрика.

**Разрушение диэлектрика поверхностными частичными разрядами.** Исследования разрушения диэлектриков под действием ПЧР проводились в электродной системе, показанной на рис. 1, в которой радиус скругления высоковольтного электрода  $R$  изменялся от 0,05 до 20 мм, а заземленным электродом служила металлическая фольга, притирающаяся к поверхности образца. Образцы изоляционных материалов (пластины, толщина которых  $\Delta$  варьировалась в диапазоне от 1,0 до 10 мм) помещались между электродами, причем высоковольтный электрод закреплялся таким образом, чтобы исключалась возможность его перемещения в процессе испытаний. Основное число испытаний различных диэлектриков проводилось с высоковольтным электродом в виде иглы с радиусом  $R=0,05$  мм (промежуток «игла—диэлектрик—плоскость»). Перечень испытанных материалов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Тип диэлектрика	Товарная марка материалов
Политетрафторэтилен (ПТФЭ)	Фторлон-4
Полиэтилен (ПЭ)	
Термопласт (ТП)	Капролон-В
Эпоксидный заливочный компаунд горячего отверждения с наполнителем (ЭЗК)	ЭЗК-10, ЭЗК-14, ЭЗК-31, ЭДК, НЕО, ЭНС-6Т
Термостойкий заливочный компаунд (ТЗК)	ЭТЗ-16/1, ЭТЗ-16М, ТЗК-2, СК-13, СП-40
Эпоксидный пропиточный компаунд без наполнителя (ЭПК)	ЭТП-16
Пластмасса (реактопласт)	К-255-51, АГ-4С, ДСВ-4-Р-2М

Испытания проводились на образцах с чистой и сухой поверхностью при нормальных атмосферных условиях. Синусоидальное напряжение подавалось на испытательный промежуток от источника, обеспечивающего регулирование частоты от 50 Гц до 120 кГц. При испытаниях измерялись частота  $f$ , действующее значение приложенного напряжения  $U$ , а по вольт-кулоновой циклограмме определялись энергетические характеристики ПЧР: энергия  $W_{\text{ЧР}}$  за период и средняя мощность ПЧР  $P_{\text{ЧР}}=fW_{\text{ЧР}}$ . С помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) измерялась суммарная интенсивность свечения зоны разряда, а также (пу-

тем диафрагмирования фотокатода ФЭУ) световой поток с малого участка зоны ионизации (около 1  $\text{мм}^2$ ). Применялся прибор типа ФЭУ-37, область максимальной спектральной чувствительности которого лежит в пределах 380—420 нм, что по данным [4] практически совпадает с максимумом излучения ЧР в воздухе. Система перемещения ФЭУ давала возможность проводить непрерывно измерения фототока  $I_{\text{ФЭУ}}$  в различных точках зоны ионизации в процессе испытаний. Эти измерения позволяли определять распределение мощности ПЧР по зоне ионизации, так как между  $P_{\text{ЧР}}$  и  $I_{\text{ФЭУ}}$  существует достаточно жесткая корреляция [4].

Для получения вольт-кулоновых циклограмм применялся емкостной мост, собранный по схеме Дакина и Малинарика [5], в измерительную диагональ которого включался дифференциальный предусилитель осциллографа. При одновременном использовании оптической и электрической схем измерения были получены градуировочные зависимости, устанавливающие связь между  $P_{\text{ЧР}}$  и  $I_{\text{ФЭУ}}$  для всех режимов испытаний. Для измерения энергии тепловых потерь применялись калориметрические устройства, в том числе — балансные. С помощью микроскопа на срезах образцов диэлектриков определялись профили и размеры разрушений диэлектрика в зоне действия ПЧР.

**Стадии и виды разрушения полимерных диэлектриков.** При приложении высокого напряжения с кратностью  $K_U=U/U_{\text{н}}$  к испытательному промежутку в воздушной части зоны тройного сопряжения возникает разряд между высоковольтным электродом и поверхностью диэлектрика. Начальное напряжение  $U_{\text{н}}$  соответствует появлению сигналов в оптической и электрической схемах измерения. При частотах от нескольких килогерц и выше этот разряд может наблюдаться невооруженным глазом даже при неполном затемнении помещения, в котором проводится эксперимент.

Через некоторое время после возникновения ПЧР на поверхности диэлектрика наблюдались следы разрушения, появившиеся в результате его воздействия. Характер разрушения зависит от типа диэлектрика, состояния его поверхности, а также от напряжения, частоты и времени выдержки образцов под напряжением.

Было установлено, что в процессе разрушения диэлектрика можно выделить три стадии: 1) образование кратера относительно небольшой глубины с диаметром, практически равным диаметру зоны ионизации; 2) интенсивное разрушение диэлектрика и прорастание канала в его толще; 3) электрический или тепловой пробой остав-

шнейся еще неразрушенной части диэлектрика. Образование кратера на первой стадии происходит в результате эрозии поверхности диэлектрика. Такой вид разрушения соответствует относительно малым интенсивностям ПЧР, характерным для обычных рабочих режимов изоляции. По мере возрастания интенсивности ПЧР (например, за счет увеличения частоты или напряжения) вид разрушения изменяется. По видам разрушения все исследованные диэлектрики могут быть разделены на две группы.

В первую группу попадают заливочные компаунды с наполнителями — кварцевым песком, тальком и т.п. У них образование кратера эрозии на первой стадии связано с разрушением органического компонента диэлектрика и уносом его из зоны разряда. Кратер имеет конусообразную форму. С увеличением напряжения до  $(3 \div 5)U_h$  и частоты до 10 кГц и более, а также времени выдержки образца под напряжением в местах наибольшей глубины кратера возникают и развиваются (вплоть до пробоя) в диэлектрике по направлению к противоположному электроду каналы — дендриты. Дальнейшее увеличение интенсивность ПЧР сопровождается появлением треков на поверхности диэлектрика, с которыми связана термодеструкция полимера.

Вторая группа материалов — ПТФЭ, ПЭ, ТП, ЭПК. Эти материалы не содержат наполнителя. Для них при малой интенсивности ПЧР характерным видом разрушения также, как и в первом случае, является образование конусообразного кратера. Рост частоты и напряжения сопровождается появлением устойчивых ярких каналов у поверхности диэлектрика, под которыми возникает глубокая местная эрозия. В дальнейшем процесс завершается образованием полости, часто в форме сферы. К этому же виду разрушения можно отнести и развитие цилиндрических полостей, которые наблюдались у компаунда ЭКС-6Т с наполнителем в виде стеклянных сфер микронных размеров. Для этой группы диэлектриков, в отличие от предыдущей, характерным является расплавление полимера в зоне разряда, а не образование дендрита.

Как показывает анализ тепловых процессов в зоне ПЧР, деление диэлектриков на группы по характеру развития разрушения связано с различиями в их теплофизических характеристиках. Различные виды разрушения определяются интенсивностью ПЧР, т.е. величиной энергии, внедряемой в зону разряда.

**Энергетические характеристики ПЧР.** Средняя мощность ПЧР  $P_{\text{ЧР}}$ . При изменении в широких пределах  $K_U$  и  $f$  были получены зависимости средней мощности  $P_{\text{ЧР}}$  от  $K_U$  и  $f$ , характерный вид которых для одного из материалов пред-

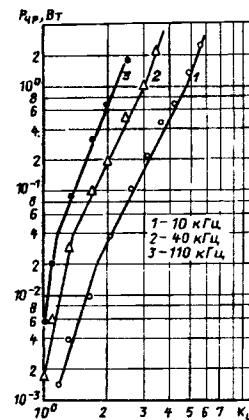


Рис. 2. Зависимость  $P_{\text{ЧР}}$  от кратности напряжения  $K_U$  и частоты  $f$  в промежутке «игла—диэлектрик—плоскость» (диэлектрик—эпоксидный компаунд ЭЗК-14 толщиной 10 мм)

ставлен на рис. 2. Для всех исследованных материалов зависимости носят аналогичный характер и могут быть описаны выражением

$$P_{\text{ЧР}} = A K_U^m f^n. \quad (1)$$

Значения параметров  $A$ ,  $m$  и  $n$  на различных участках зависимостей различны и могут быть получены расчетным путем для конкретного вида промежутка с помощью модели мгновенного источника тепла, либо по экспериментальным зависимостям (рис. 2).

**Границы изменения видов разрушения.** Изменение вида разрушения связано с превышением при определенной интенсивности ПЧР некоторой граничной температуры его поверхности. В установившемся режиме перегрев диэлектрика  $\Delta T_y$  в зоне ПЧР зависит от его теплопроводности  $\lambda$  и связан с тепловым потоком  $Q$  через площадку образца в зоне ПЧР соотношением

$$\Delta T_y = \theta \frac{Q}{\lambda G}, \quad (2)$$

где  $G$  — геометрический фактор, учитывающий форму и размеры источника тепла и образца диэлектрика;  $\theta$  — температурный параметр, зависящий от теплофизических свойств диэлектрика и окружающей среды.

Положим с некоторым запасом, что количество тепловой энергии, переданное диэлектрику за единицу времени, равно мощности разряда  $P_{\text{ЧР}}$ , затраченной на разрушение этого диэлектрика. Тогда, с учетом (1),  $Q$  можно представить в виде функции  $f$  и  $K_U$ , и, следовательно,

$$\Delta T_y = \theta \frac{A}{\lambda} K_U^m f^n. \quad (3)$$

Пусть при перегревах, меньших  $\Delta T_1$ , разрушение возможно только в виде эрозии; при  $\Delta T_y > \Delta T_2$  происходит образование треков и пробой образца, а в диапазоне  $\Delta T_1 - \Delta T_2$  может наблюдаться терморазрушение с образованием дендрит-

тов и полостей в диэлектрике. Тогда согласно (3) линии изотерм  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  разделят квадрант ( $f, K_U$ ) сочетаний значений кратностей напряжений и частот при ПЧР на три области (рис. 3):

область I — основным механизмом разрушения диэлектрика является здесь эрозия поверхности под действием бомбардировки ее заряженными частицами;

область II — интенсивность ПЧР такова, что происходит нагрев диэлектрика в зоне разряда до температур плавления полимера и его терморазложения;

область III — интенсивность ПЧР настолько высока, что образуются треки на поверхности диэлектрика и происходит быстрый пробой образца.

**Допустимые пределы интенсификации факторов, ускоряющих старение полимера при испытаниях.** Для рабочих режимов изоляции характерны малые значения  $K_U$ , основным механизмом разрушения является эрозия. Поэтому испытания целесообразно проводить при  $K_U$  и  $f$ , соответствующих областям I рис. 3.

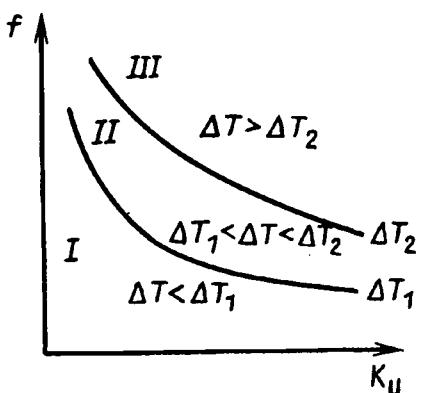


Рис. 3. Области сочетаний  $f$  и  $K_U$ , определяющие виды разрушения диэлектрика

Конкретные значения этих величин могут быть получены, если воспользоваться выражением для температуры перегрева диэлектрика, в соответствии с [7]:

$$\Delta T_y \approx \frac{7,25 \bar{e} Q_b f^{1.5}}{e \rho c_p (4\pi D)^{1.5}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность диэлектрика;  $D$  — коэффициент температуропроводности;  $Q_b/e$  — число электронов в единичном частичном разряде;  $c_p$  — удельная теплоемкость;  $\bar{e}$  — средняя энергия электронов.

Выражение (4) выведено на основе анализа разогрева полимерных диэлектриков под действием частичных разрядов, проведенного исходя из модели воздействия на поверхность диэлектрика плоского мгновенного источника тепла. Оно получено в предположении, что за один полупериод приложенного напряжения происходит

один частичный разряд длительностью  $t_p$ , и учитывает интегральный эффект воздействия частичных разрядов на изоляционный материал.

С ростом кратности  $K_U$  напряжения число разрядов за один полупериод возрастает и может быть определено по выражению

$$\nu = \frac{2K_U - 1 - \eta}{1 - \eta}, \quad (5)$$

где  $\eta$  — коэффициент гашения частичного разряда.

Величина  $\bar{e} Q_b e^{-1}$ , входящая в выражение (4), есть не что иное, как энергия, единичного частичного разряда  $W_b$ , выделившаяся на поверхности диэлектрика в пределах круга с радиусом

$$r = 2 \sqrt{D(t_p + t_t)}, \quad (6)$$

где  $t_t$  — время, в течение которого обеспечиваются условия теплопередачи.

Определение длительности ПЧР  $t_p$  как времени достижения максимума напряжения на измерительных элементах схемы показало, что при напряжении, близком к начальному, вне зависимости от частоты приложенного напряжения, оно составляет, примерно, несколько сотых долей микросекунды. С ростом напряжения, наряду с разрядами такой длительности, возникают разряды с длительностью, в 5–10 раз большей.

Определить время  $t_t$  довольно затруднительно. В [7] оно оценивается значением порядка  $10^{-12}$  с. Во всяком случае, оно значительно меньше, чем время  $t_p$ , и поэтому вместо (6) можно записать

$$r = 2 \sqrt{D t_p}. \quad (7)$$

Будем полагать, что вся энергия ПЧР выделяется в пределах кольцевой зоны, которая наблюдается при электрографических исследованиях как зона осевшего на поверхности диэлектрика заряда [8].

Примем в качестве расчетной модели кольцо шириной  $2r$ . Средний радиус этого кольца можно определить как  $R \operatorname{tg} \beta_0$ , где  $R$  — радиус скругления высоковольтного электрода,  $\beta_0$  — угол между нормалью к поверхности твердого диэлектрика, проведенный через точку касания электрода и диэлектрика, и направлением из центра скругления электрода на ту силовую линию электрического поля, по которой условие самостоятельности разряда выполняется при наименьшем напряжении. Как показывают расчеты начального напряжения для диэлектриков толщиной 2,5–5,0 мм с относительной диэлектрической проницаемостью 2–7, этот угол находится в пределах 15–25°.

Для рассматриваемой модели соотношение между энергией единичного ПЧР  $W_b$  и энергией

$W'_{\text{ЧР}}$ , выделившейся за период приложенного напряжения, определяется выражением

$$W_{\text{в}} = W'_{\text{ЧР}} \frac{2 \sqrt{D} t_p}{\pi R \operatorname{tg} \beta_0}, \quad (8)$$

а выражение (4) после несложных преобразований приводится к виду

$$\Delta T_y \approx \frac{6,33 \cdot 10^{-2} \sqrt{2t_p f} W'_{\text{ЧР}}}{\lambda R \operatorname{tg} \beta_0}. \quad (9)$$

Число разрядов за полупериод зависит от приложенного напряжения, однако уже при кратностях  $K_U > 2 \div 4$  произведение  $W'_{\text{ЧР}} f^{1,5}$  мало меняется при увеличении  $v$ . Поэтому с определенным запасом примем, что суммарное время горения разряда за период напряжения равно  $10^{-6}$  с. Тогда выражение (9) примет вид

$$\Delta T_y = \frac{8,9 \cdot 10^{-5} W'_{\text{ЧР}} f^{1,5}}{\lambda R \operatorname{tg} \beta_0}. \quad (10)$$

На основании полученного выражения на рис. 4 построена серия зависимостей, определяющая предельные значения частоты  $f$ , энергии ПЧР  $W'_{\text{ЧР}}$  при испытаниях полимеров с различными значениями допустимых температур нагрева  $T_{\text{доп}}$  и теплопроводностей  $\lambda$ .

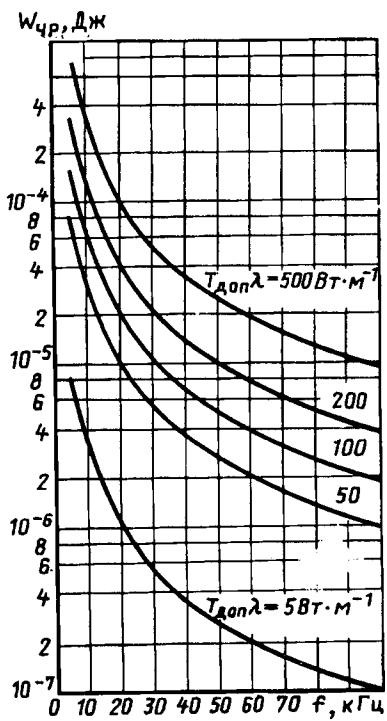


Рис. 4. Предельные частоты напряжения  $f$  и энергии ПЧР  $W'_{\text{ЧР}}$  для испытаний твердых полимерных диэлектриков в промежутке «игла—диэлектрик—плоскость» (значения  $T_{\text{доп}}$  соответствуют I области рис. 3)

Доля энергии, затрачиваемая на разрушение диэлектрика  $\alpha$ . Часть энергии ПЧР не участвует в разрушении диэлектрика. Полную энергию  $W'_{\text{ЧР}}$  или мощность  $P_{\text{ЧР}}$  можно разделить на

энергию  $W_p$  или мощность  $P_p$ , затрачиваемую на разрушение диэлектрика, и на энергию или мощность потерь, которая в конечном итоге переходит в тепловые потери ( $W_{\text{т.п}}$  или  $P_{\text{т.п}}$ ).

Прямым экспериментом  $W_p$  или  $P_p$  определить достаточно трудно. Однако возможно измерить  $W'_{\text{ЧР}}$  или  $P_{\text{ЧР}}$ , а также  $W_{\text{т.п}}$  или  $P_{\text{т.п}}$ . Такие измерения для исследуемых материалов были проведены в широких диапазонах изменения  $K_U$  и  $f$ . Как уже отмечалось, мостовым методом по вольт-кулоновым циклограммам определялись  $W'_{\text{ЧР}}$  и  $P_{\text{ЧР}}$ , а значение  $P_{\text{т.п}}$  измерялось калориметрическими методами. Долю мощности ПЧР, затрачиваемую на разрушение диэлектрика, удобно характеризовать отношением

$$\alpha = \frac{P_p}{P_{\text{ЧР}}} = \frac{P_{\text{ЧР}} - P_{\text{т.п}}}{P_{\text{ЧР}}}, \quad (11)$$

которое будем называть коэффициентом разрушающего действия ПЧР.

Для промежутка «игла—диэлектрик—плоскость» и исследуемых материалов были измерены величины  $P_{\text{ЧР}}$  и  $P_{\text{т.п}}$  при изменении  $P_{\text{ЧР}}$  от долей ватт до нескольких ватт. По результатам этих измерений на рис. 5 построена обобщенная зависимость  $\alpha$  от  $P_{\text{ЧР}}$ . Из этой зависимости следует, что значения  $\alpha$  могут изменяться в широких пределах — от единиц процентов до значений, близких к 100%, в зависимости от условий испытаний. Это снимает встречающиеся в литературе противоречия и одновременно указывает на необходимость учета величины  $\alpha$  при испытаниях материалов.

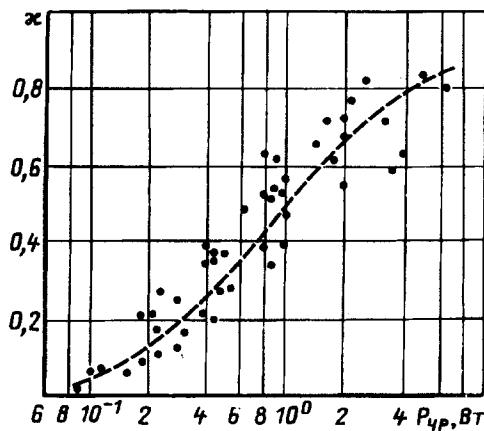


Рис. 5. Обобщенная зависимость коэффициента разрушающего действия  $\alpha$  от мощности ПЧР  $P_{\text{ЧР}}$  в промежутке «игла—диэлектрик—плоскость» (точки — экспериментальные значения в диапазоне частот 10–100 кГц)

Плотность мощности ПЧР  $P_{\text{уд}}$ . Эта величина, необходимая для характеристики интенсивности ПЧР в различных точках зоны ионизации, определяется как количество энергии, выделившейся в единицу времени на единичном участке поверхности диэлектрика. Очевидно, что интенсив-

нность разрушения диэлектрика в данной точке зоны ионизации определяется значением  $P_{уд}$  в этой точке. Измерения профилей кратера эрозии показали, что они имеют характерную конусообразную форму. Отсюда можно сделать вывод о том, что  $P_{уд}$  распределена неравномерно по зоне ионизации. При этом с точки зрения оценки времени жизни диэлектрика наибольший интерес представляет максимальное значение  $P_{уд}$ , соответствующее наибольшей глубине кратера эрозии, так как развитие канала разряда из этой области, как правило, приводит к завершению разрушения диэлектрика под действием ПЧР.

Распределение  $P_{уд}$  по зоне ионизации определялось по распределению  $I_{ФЭУ}$  по этой зоне для разнообразных испытательных промежутков, у которых плоский образец диэлектрика располагался на заземленной плоскости, а высоковольтными электродами были игла, шар, стержень и т.д. Измерения проводились при частотах 8–120 кГц и напряжениях 3–10 кВ [6]. На рис. 6 в качестве примера показаны распределения  $P_{уд}$  и профиля кратера эрозии по зоне ионизации для промежутка «игла–диэлектрик–плоскость».

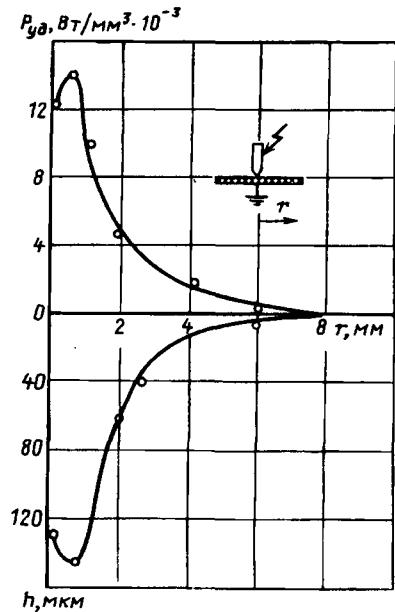


Рис. 6. Распределение плотности мощности ПЧР  $P_{уд}$  и глубины кратера эрозии  $h$  по зоне ионизации для промежутка «игла–диэлектрик–плоскость»:  $U=3,6$  кВ;  $f=117$  кГц, диэлектрик ЭЗК-14 толщиной  $\Delta=2$  мм

Измерения позволили установить зависимости  $P_{уд}$  от глубины кратера эрозии  $h$  для различных промежутков. Для промежутка «игла–диэлектрик–плоскость» она оказалась практически линейной в интервале изменения  $P_{уд}=0\div30$  мВт/мм<sup>2</sup> и  $h=0\div250$  мкм. Это обстоятельство определяет выбор промежутка «игла–диэлектрик–плоскость» для проведения ускоренных испытаний диэлектриков на стойкость к действию частичных

разрядов.

Удельная энергия разрушения  $w_p$ . Изложенный выше анализ характера и интенсивности разрушения поверхности твердых полимерных диэлектриков под действием ПЧР показывает, что в качестве энергетического параметра, характеризующего стойкость полимера к действию этих разрядов, может быть использовано количество энергии, затраченной на разрушение единицы объема материала  $w_p$ . Определение этой характеристики должно производиться с учетом доли энергии, затрачиваемой на разрушение диэлектрика при ПЧР и в том диапазоне значений интенсивности разряда, в котором механизм разрушения диэлектрика соответствует механизму разрушения при рабочих условиях.

Выражение для  $w_p$  может быть записано в виде

$$w_p = W_p/V, \quad (12)$$

где  $W_p = P_{ЧР} t \varkappa$ , Дж/мм<sup>3</sup>;  $V$  — объем разрушенного за время испытаний материала диэлектрика, мм<sup>3</sup>;  $t$  — время испытаний, с;  $P_{ЧР}$  — мощность ПЧР, Вт, измеренная при заданных значениях  $K_U$  и  $f$  (рис. 2);  $\varkappa$  — коэффициент разрушающего действия ПЧР (рис. 5).

Для широкого перечня полимерных диэлектриков (табл. 1) были проведены эксперименты по ускоренному старению материала. опыты проводились в испытательном промежутке «игла–диэлектрик–плоскость» при толщинах плоских образцов диэлектрика  $\Delta=1,9\div3,5$  мм. Значения  $K_U=2,2\div5,0$  и  $f=17\div138$  кГц выбирались из условия эрозионного разрушения полимера (рис. 4), давление воздуха было близким к нормальному ( $p_0=100$  кПа). Время испытаний  $t$  составляло для различных материалов от 2 до 59 ч. После выдержки под напряжением в течение времени  $t$  с помощью микроскопа измерялись объемы  $V$  кратера эрозии, т.е. объемы разрушенного за это время материала диэлектрика. Кроме того, образцы выдерживались при указанных условиях испытаний до пробоя, т.е. для них определялось время жизни  $\tau$ . Значения  $V$  и  $\tau$  для каждого режима определялись как средние по данным для пяти образцов. Среднее значение удельной энергии разрушения  $w_p$  для данного материала вычислялось по результатам испытаний во всех режимах. Экспериментальные данные, а также  $\bar{w}_p$  для некоторых диэлектриков приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 значения удельной энергии разрушения в ряде случаев не соответствуют имеющимся в литературе данным о энергетических характеристиках стойкости полимеров к действию разрядов. Это, на наш взгляд, как правило, объясняется тем, что в известных нам

работах в том или ином виде предполагается постоянство (в известных пределах) коэффициента, соответствующего  $\bar{w}_p$ .

Таблица 2

Тип диэлектрика	$K_U$	$t$ , ч	$W_p$ , кДж	$V$ , $\text{мм}^3$	$w_p$ , кДж/ $\text{мм}^3$	$\bar{w}_p$ , кДж/ $\text{мм}^3$
Фторлон-4	2,2	3	0,76	0,64	1,20	1,20
ЭЗК-14	4	3	3,72	1,51	2,46	2,00
		4	4,95	3,35	1,48	
		6	7,43	3,59	2,07	
		9	11,15	3,60	3,10	
	5	2	14,47	7,81	1,85	
		3	21,71	18,60	1,17	
СК-13	3	6	0,85	0,06	13,11	
		18	2,55	0,14	17,73	15,40
ЭТЗ-16/1	3	6	0,87	0,04	24,70	
		18	2,59	0,13	20,40	22,60

Универсальность характеристики  $\bar{w}_p$  подтверждается в том случае, если существует достаточно жесткая линейная корреляция между  $w_p$  и временем жизни  $\tau$ . Наличие такой корреляции доказывается как расчетным путем, так и данными прямых экспериментов.

Зная из опыта величину  $\bar{w}_p$  и значение  $P_{уд\max}$ , соответствующее наибольшей глубине кратера эрозии  $h_{\max}$ , можно определить время жизни образца:

$$\tau = \frac{\bar{w}_p (\Delta - \Delta_{\text{пр}})}{P_{уд\max}}, \quad (13)$$

где  $\Delta_{\text{пр}}$  — толщина слоя диэлектрика, разрушающегося на третьей стадии старения.

Было показано, что для промежутка «игла—диэлектрик—плоскость»  $P_{уд} = bh$ . Поскольку за время  $\tau$  наибольшая глубина кратера эрозии  $h_{\max}$  практически достигает величины  $\Delta$ , то можно записать, что

$$\tau = \bar{w}_p / b, \quad (14)$$

т.е. удельная энергия разрушения пропорциональна времени жизни.

По результатам прямых измерений  $\tau$  и результатам расчетов по данным прямых измерений  $\bar{w}_p$  на рис. 7 построена зависимость, устанавливающая связь между  $\tau$  и  $\bar{w}_p$  для различных полимерных материалов, которая показывает наличие жесткой линейной корреляции между  $\tau$  и  $\bar{w}_p$ .

**Выводы.** Исследования позволили описать стадии и виды разрушения полимерных диэлектриков при ПЧР. Два вида разрушения — прорастание дендрита или «проплавление» — связаны со структурой полимера. Три стадии разрушения зависят от длительности и интенсивности воздействия ПЧР на полимер. Результаты комплексных измерений электрических, оптических и термических характеристик ПЧР, а также геометрических характеристик зоны разрушения мате-

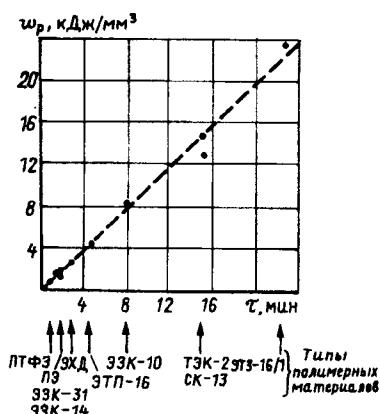


Рис. 7. Связь между временем жизни  $\tau$  и удельной энергией разрушения диэлектриков  $\bar{w}_p$  (промежуток «игла—диэлектрик—плоскость»,  $\Delta=2$  мм,  $f=40$  кГц)

риала диэлектрика при ПЧР позволили предложить величину удельной энергии разрушения диэлектрических материалов  $\bar{w}_p$  в качестве универсальной характеристики их стойкости к воздействию частичных разрядов. Расчеты и эксперименты подтвердили линейную связь этой характеристики с временем жизни диэлектрика.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. — М.: Энергия, 1979.
2. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения / Под ред. Г.С. Кучинского. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Аронов М.А., Ларионов В.П., Харченко А.Ф. Исследование поверхностных частичных разрядов при переменном напряжении — Электричество, 1972, № 9.
5. Dakin T.W., Malinaric P.I. Capacitance bridge Method for Measuring Integrated Corona-Charge Transfer and Power Loss per Cycle. — Trans. AIEE, 1960, vol. 79, № IV.
6. Аронов М.А., Иванов А.В., Кокуркин М.П. Энергетические характеристики поверхностных частичных разрядов. — Труды МЭИ, 1977, вып. 344.
7. Ильченко Н.С., Кириленко В.М. Полимерные диэлектрики. — Киев: Техника, 1977.
8. Иванов А.В. Применение электрографии для исследования объемных и поверхностных зарядов. — Автореф. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / МЭИ, 1971.

*Авторы: Аронов Михаил Александрович окончил электротехнический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1953 г. В 1964 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование характеристик открытой электрической дуги и их практическое использование». Доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений МЭИ.*

*Кокуркин Михаил Павлович окончил электротехнический факультет МЭИ в 1970 г. В 1986 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка методики ускоренных испытаний полимерной изоляции на основе исследования поверхностных частичных разрядов при высокой частоте». Старший научный сотрудник Всероссийского электротехнического института.*

# Растекание зарядов, оседающих на поверхности газового включения в высоковольтном твердом диэлектрике

ЧАН КИ ФУК

Показана важность учета процесса растекания зарядов, оседающих на поверхности газового включения в высоковольтном твердом диэлектрике после частичного разряда. Приведено математическое описание указанного процесса и на примере включения сферической формы при конечном и неизменном значении поверхностной проводимости диэлектрика показано влияние на неоднородность электрического поля во включении и на запаздывание частичного разряда.

Частичные разряды, возникающие в газовом включении в высоковольтном твердом диэлектрике, приводят к оседанию зарядов на поверхности включения. Электрическое поле оседающих зарядов препятствует или способствует дальнейшему развитию частичных разрядов в зависимости от полярности приложенного напряжения и от степени деформации поля указанными зарядами. Следовательно, поле оседающих зарядов играет большую роль в оценке уровня частичных разрядов и, как следствие, — уровня разрушения диэлектрика. Результаты последних исследований [1] показывают, что растекание указанных зарядов является главной причиной перехода от импульсного характера разряда к диффузному. Обычно считается, что процесс растекания оседающих зарядов происходит по экспоненциальному закону и только благодаря объемной проводимости диэлектрика [2, 3]. Однако во многих работах было установлено, что под действием частичных разрядов поверхностная проводимость диэлектрика в области разряда так сильно увеличивается, что поверхностный ток оседающих зарядов преобладает над объемным.

**Постановка задачи.** Газовое включение сферической формы радиусом  $R$  находится в диэлектрике, который занимает остальное бесконечное пространство ( $\epsilon_1, \epsilon_2$  — диэлектрические проницаемости диэлектрика и газа соответственно;  $\gamma_s$  — поверхностная проводимость сферической поверхности). Объемные проводимости диэлектрика и газа и внешнее электрическое поле для простоты считаются равными нулю. Предполагается, что в момент  $t=0$  на поверхности  $r=R$  в сферической системе координат  $(r, \Theta, \alpha)$  от некоторого частичного разряда оседают заряды с аксиально-симметричным распределением  $q=q(\Theta)$ . Определим закон изменения распределения оседающих зарядов и электрического поля по времени. Для указанных выше условий уравнение непрерывности токов для поверхности  $r=R$  имеет вид

*Significance of accounting spread of charge lodged on the surface of gaseous cavity in HV solid dielectric after partial discharge is discussed. The spread of charge is mathematically described and with example of spherical cavity in case of finite and constant surface conductivity affect on heterogeneity of the electric field in the cavity and affect on time lag of partial discharges are shown.*

$$\operatorname{div} \vec{J}_s + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где  $\vec{J}_s$  — плотность поверхностного тока;  $\sigma$  — плотность зарядов на границе «твердый диэлектрик—газ». Поскольку на поверхности сферы  $r=R$  выполняются следующие условия:

$$\vec{J}_s = \gamma_s \vec{E}_\Theta; \quad (2)$$

$$\sigma = \epsilon_0 (\epsilon_2 E_{2r} - \epsilon_1 E_{1r}), \quad (3)$$

где  $\vec{E}_\Theta$  — тангенциальная составляющая электрического поля;  $E_{1r}, E_{2r}$  — нормальные составляющие электрического поля вне и внутри сферы, соответственно;  $\sigma$  — плотность поверхностных зарядов на сфере  $r=R$ , то можно показать, что

$$\operatorname{div} \vec{J}_s = -\gamma_s \frac{1}{r^2 \sin \Theta} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left( \sin \Theta \frac{\partial \varphi}{\partial \Theta} \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( \epsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} - \epsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \right), \quad (5)$$

где  $\varphi, \varphi_1$  и  $\varphi_2$  — потенциальные функции:

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_1 & \text{в области вне сферы } (r>R); \\ \varphi_2 & \text{в области внутри сферы } (r<R). \end{cases}$$

Суммируя (4) и (5), получаем для  $r=R$

$$-\gamma_s \frac{1}{r^2 \sin \Theta} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left( \sin \Theta \frac{\partial \varphi}{\partial \Theta} \right) + \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( \epsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} - \epsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \right) = 0. \quad (6)$$

На основе метода разделения переменных и разложения по сферическим функциям [4] будем предполагать, что

$$\varphi = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(r, \Theta) v_n(t); \quad \varphi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} u_{1n}(r, \Theta) v_n(t)$$
$$\text{и } \varphi_2 = \sum_{n=0}^{\infty} u_{2n}(r, \Theta) v_n(t), \quad (7)$$

где  $v_n(t)$  — функция от времени, причем  $v_n(0)=1$ , поэтому

$$u = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(r, \Theta); \quad u_1 = \sum_{n=0}^{\infty} u_{1n}(r, \Theta)$$

$$\text{и } u_2 = \sum_{n=0}^{\infty} u_{2n}(r, \Theta) \quad (8)$$

— функции только от переменных  $r$  и  $\Theta$ , представляющие собой потенциалы в момент  $t=0$ .

Будем определять  $u_1(r, \Theta), u_2(r, \Theta)$  как потенциал поля осевших зарядов с начальным распределением

$$q = \begin{cases} q_0, & r=R, \Theta=0; \\ -q_0, & r=R, \Theta=\pi \\ 0 & \text{в остальных точках.} \end{cases} \quad (9)$$

Можно доказать, что в этом случае

$$u_{1n} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 R} \frac{(4n+3)}{(2n+1)\epsilon_2 + (2n+2)\epsilon_1} \left(\frac{R}{r}\right)^{2n+2} \times \times P_{2n+1}(\cos \Theta); \quad (10)$$

$$u_{2n} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 R} \frac{(4n+3)}{(2n+1)\epsilon_2 + (2n+2)\epsilon_1} \left(\frac{r}{R}\right)^{2n+1} \times \times P_{2n+1}(\cos \Theta), \quad (11)$$

где  $P_{2n+1}(\cos \Theta)$  — полином Лежандра.

Поставляя (9) в (8), получаем для  $r=R$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left( \frac{-\gamma_s}{r^2 \sin \Theta} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left( \sin \Theta \frac{\partial u_n}{\partial \Theta} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \epsilon_0 \left( \epsilon_2 \frac{\partial u_{2n}}{\partial r} - \epsilon_1 \frac{\partial u_{1n}}{\partial r} \right) \frac{\partial v_n}{\partial t} \right) \right\} = 0. \quad (12)$$

Решение уравнения (12) относительно  $v_n(t)$  при начальном условии  $v_n(0)=1$  будет

$$v_n(t) = \exp(-\beta_n t), \quad (13)$$

где

$$\beta_n = \frac{\frac{-\gamma_s}{r^2 \sin \Theta} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left( \sin \Theta \frac{\partial u_n}{\partial \Theta} \right)}{\epsilon_0 \left( \epsilon_2 \frac{\partial u_{2n}}{\partial r} - \epsilon_1 \frac{\partial u_{1n}}{\partial r} \right)}. \quad (14)$$

Дифференцируя (10) и (11) и поставляя в (14), имеем

$$\beta_n = \frac{(-2 \cos \Theta Q'_{2n+1} + \sin^2 \Theta Q_{2n+2}) \gamma_s}{((2n+2)\epsilon_1 + (2n+1)\epsilon_2) \epsilon_0 R} = \alpha_n / \tau, \quad (15)$$

где

$$\alpha_n = \frac{(-2 \cos \Theta Q'_{2n+1} + \sin^2 \Theta Q''_{2n+2})}{((2n+2)\epsilon_1 + (2n+1)\epsilon_2)}; \\ \tau = \epsilon_0 R \frac{1}{\gamma_s};$$

$$Q'_{2n+1} = \frac{dP_{2n+1}(\cos \Theta)}{d(\cos \Theta)} \frac{1}{P_{2n+1}(\cos \Theta)};$$

$$Q''_{2n+1} = \frac{d^2P_{2n+1}(\cos \Theta)}{d(\cos \Theta)^2} \frac{1}{P_{2n+1}(\cos \Theta)}.$$

Из (10), (11), (13), (15) и (7) получаем выражения для потенциальных функций  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$

$$\varphi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 R} \frac{(4n+3)}{(2n+2)\epsilon_1 + (2n+1)\epsilon_2} \left(\frac{R}{r}\right)^{2n+2} \times \times P_{2n+1}(\cos \Theta) \exp(-\alpha_n \frac{t}{\tau}); \quad (16)$$

$$\varphi_2 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 R} \frac{(4n+3)}{(2n+2)\epsilon_1 + (2n+1)\epsilon_2} \left(\frac{r}{R}\right)^{2n+1} \times \times P_{2n+1}(\cos \Theta) \exp(-\alpha_n \frac{t}{\tau}). \quad (17)$$

Плотность поверхностных зарядов на поверхности включения определяется из (3), (16) и (17)

$$\sigma = \sigma_0 \sum_{n=0}^{\infty} (4n+3) P_{2n+1}(\cos \Theta) \exp(-\alpha_n \frac{t}{\tau}), \quad (18)$$

где  $\sigma_0 = \frac{q}{2\pi R^2}$ .

Закон изменения плотности поверхностных зарядов  $\sigma$  по времени иллюстрируется на рис. 1 и 2. Как видно из графика рис. 1, в точке

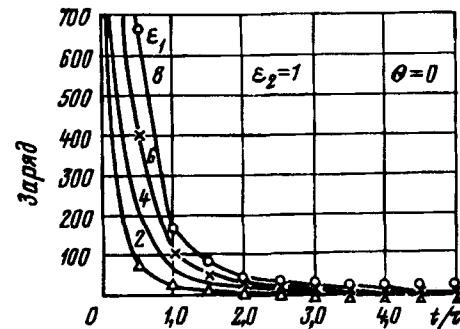


Рис. 1. Изменение плотности поверхностных зарядов  $\sigma$  по времени в точке  $\Theta=0$

$\Theta=0$  заряд уменьшается монотонно со временем по нечию экспоненциальному закону. В других точках поверхности заряд увеличивается от нуля до некоторого максимального значения  $\sigma_{\max}$  и затем уменьшается. Чем дальше от центра начального распределения ( $\Theta=0$ ), тем меньше значение  $\sigma_{\max}$  и тем больше необходимо времени для достижения этого значения.

Аксиальное электрическое поле внутри включения определяется как

$$E_z = \frac{\partial \varphi_2}{\partial r}$$

или

$$E_z = -2E_{z0} \sum \frac{(4n+3)(2n+1)}{(2n+2)\epsilon_1 + (2n+1)\epsilon_2} \left(\frac{r}{R}\right)^{2n} \times \times P_{2n+1}(\cos \Theta) \exp(-\alpha_n \frac{t}{\tau}), \quad (19)$$

где  $E_{z0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$ .

На рис. 2 иллюстрируется изменение аксиального электрического поля внутри включения по времени. Чем дальше растекается заряд, тем мень-

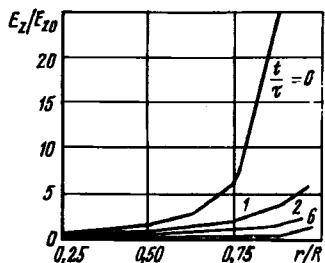


Рис. 2. Изменение аксиального электрического поля внутри включения по времени

шее значение поля и тем слабее неоднородность поля, что уменьшает вероятность зажигания последующих частичных разрядов во включении. Это положение соответствует явлению статистического запаздывания, экспериментально наблюдаемому в [5] при сравнении свежих образцов, образцов после наработки и образцов после «отдыха». Что касается влияния проводимостей, то видно, что чем больше значения проводимости, тем больше скорость растекания зарядов и уменьшения неоднородности поля.

**Выводы.** 1. При конечном значении поверхностной проводимости диэлектрика, заряды, оседающие на стенке газового включения после очередного частичного разряда, растекаются по закону, более сложному, чем экспоненциальный.

2. Растекание поверхностных зарядов приводит не только к уменьшению модульного электрического поля в газовом включении, но и к ос-

лаблению неоднородности поля, что является основной причиной статистического запаздывания частичного разряда в маленьком замкнутом газовом включении.

3. На скорость растекания зарядов влияют не только значения проводимости, но и значения проницаемости диэлектрика и размера включения (радиус  $R$  в случае сферического включения). Влияние внешнего электрического поля на скорость растекания зарядов требует дальнейшего исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hudon C., Bartnikas R. and Wertheimer. Spark-to-glow Discharge Transition due to Increased Surface Conductivity on Epoxy Resin Specimens. — IEEE Trans. on Elec. Insul., 1993, vol. 28, № 1.
2. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. — Л.: Энергия, 1979
3. Мейсон Дж. Электрический пробой твердой изоляции. — В кн.: Прогресс в области диэлектриков. Т. 1 / Под ред. Дж.Беркса и Дж.Шульман — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1972.
5. Moriochi T., Tan M. Partial Discharge Properties in spherical void in epoxy resins. — IEEE Conf. Rec. Int. Symp. Elec. Insul., 1978.

[10.01.94]

*Автор:* Чан Ки Фук окончил Харьковский политехнический институт в 1990 г. В 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Амплитудно-фазовые спектры импульсов частичных разрядов в высоковольтной твердой изоляции» в Московском энергетическом институте.

## Определение электрической структуры облаков с помощью модели с объемным зарядом

ОРЛОВ А.В., ПЕТУХОВ В.С.

Представлена оценка электрической структуры облаков на основе данных измерений напряженности электрического поля на поверхности земли несколькими датчиками. Предложена модель электрической структуры облака, которая учитывает заряд, расположенный по его объему. В модели принято допущение, что плотность объемного заряда изменяется только по вертикали. Модель служит для определения электрической структуры облаков и нахождения количественных значений напряженности электрического поля в окрестностях облака. Решение тестовых задач иллюстрируют работоспособность модели и предложенного подхода к определению электрической структуры облака.

**Введение.** Распределение зарядов в облаке определяет его электрическую структуру (ЭСО). Равномерное распределение электрических зарядов в облаке сложно. Исследования показывают наличие

*Estimation of a cloud electrical structure on the basis of data obtained from ground based field mills is considered. The space charge model with vertical charge distribution of an electrified cloud is used. The model permits to estimate the charge distribution in a cloud and to determine the electrical field around the cloud. Tests show effectiveness of the model and advantages of the approach to the cloud electrical structure determination.*

сложного распределения зарядов. Вместе с тем пока еще не существует каких-либо типовых моделей ЭСО, отражающих этапы изменения в распределении зарядов для различных стадий раз-

вития облаков. В настоящее время существует много различных моделей ЭСО, описание которых приведено в литературе.

Точечные модели характеризуются своей простотой и наглядностью. В этих моделях основные заряды грозового облака представлены в виде точечных зарядов, имеющих конкретные координаты. Параметры электрической структуры облака на базе этих моделей оцениваются по скачку напряженности электрического поля, возникающему из-за разряда молнии внутри облака или на землю. В первом случае модель представляется дипольным моментом, а во втором — в виде точечного заряда. Авторы, предложившие эти модели, указывают на простоту оценки ее параметров по данным текущих измерений [1—4].

В ряде работ [3, 4] приведены данные, показывающие, что простая попытка усложнить точечную дипольную модель путем введения третьего, четвертого зарядов, учитывающих, например, заряд осадков или заряд в приземном слое, весьма усложняет решение задачи. Попытки авторов представить ЭСО в его объеме в виде некоторого набора точечных зарядов не учитывают процессы, происходящие в облаке, а лишь формально и в грубом приближении их отражают [4].

Наше стремление глубже понять физику происходящих явлений в грозовом облаке связано с совершенствованием модели ЭСО. Мы стремимся построить такую модель ЭСО, которая была бы в большей степени, чем предыдущие, приближена к реальному облаку.

**Модель ЭСО с объемным одномерно распределенным зарядом.** Неотъемлемой чертой ЭСО реального облака является трехмерное распределение заряда по его объему. Эту особенность учитывает модель ЭСО с распределенным зарядом. На данном этапе мы будем рассматривать модель, в которой плотность объемного заряда зависит только от вертикальной координаты, что учитывает вертикальное разделение основных зарядов облака.

Целью задачи расшифровки ЭСО в рамках этой модели является определение параметров модели, под которыми понимается функция распределения плотности объемного заряда и границы накопления заряда.

Предположим, что облако представлено параллелепипедом рис. 1 с геометрическими параметрами  $x_0, y_0, z_0, h$ , которые определены с помощью метеорадиолокатора (МРЛ). Начало координат совмещено с геометрическим центром параллелепипеда. Тогда распределение напряженности электрического поля на поверхности земли  $E_j$  с учетом сил зеркального отображения находится следующим образом:

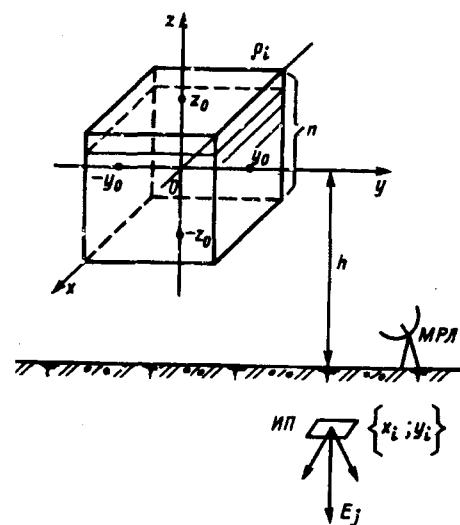


Рис. 1. Расчетная модель для расшифровки электрической структуры облака

$$E_j = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_{-z_0}^{z_0} \int_{-y_0}^{y_0} \int_{-x_0}^{x_0} \frac{(z+h)\rho dx dy dz}{[(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z+h)^2]^{3/2}}, \quad (1)$$

где  $x_j, y_j$  — координаты датчиков на поверхности земли  $1 \leq j \leq m$ ;  $\rho$  — плотность объемного заряда в облаке.

Тогда

$$E_j = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_{-z_0}^{z_0} \rho(z) k_j(z) dz, \quad (2)$$

где

$$k_j(z) = I_1 + I_2 + I_3 + I_4;$$

$$I_{1,2} = \frac{x_0 - x_j}{|x_0 - x_j|} \operatorname{arctg} \frac{(y_0 \mp y_j) |x_0 - x_j|}{(z+h)[(y_0 \mp y_j)^2 + (x_0 - x_j)^2 + (z+h)^2]^{0.5}};$$

$$I_{3,4} = \frac{x_0 - x_j}{|x_0 + x_j|} \operatorname{arctg} \frac{(y_0 \mp y_j) |x_0 - x_j|}{(z+h)[(y_0 \pm y_j)^2 + (x_0 + x_j)^2 + (z+h)^2]^{0.5}}.$$

Следовательно, обратная задача о нахождении распределения объемного заряда может быть поставлена следующим образом.

Найти функцию  $\rho(z)$  на отрезке  $[-z_0; z_0]$ , доставляющую минимум функционалу

$$\Phi = \sum_{j=1}^m \left[ -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_{-z_0}^{z_0} \rho(z) k_j(z) dz - E_{ej} \right]^2, \quad (3)$$

где  $E_{ej}$  — значение напряженности электрического поля, измеренное  $j$ -м датчиком.

Разобьем область  $[-z_0; z_0]$  изменения искомой функции  $\rho(z)$  на  $n$  отрезков и в пределах каждого отрезка разбиения  $[z_k; z_{k+1}]$ ,  $k=1 \dots n$  функцию  $\rho(z)$  аппроксимируем линейной зависимостью

$$\rho_k(z_k) = \rho_{k-1}(z_k).$$

Тогда задача (3) заменяется следующей ли-

неаризованной задачей метода наименьших квадратов.

Найти решение линейной алгебраической системы уравнений

$$Ax = b,$$

такое, что норма  $\|Ax - b\| = \min$ , где  $b$  — вектор-столбец, элементы которого  $b_j = -2\pi\varepsilon_0 E_{ej}$ ,  $j = 1 \dots m$ ;  $x$  — вектор-столбец, элементы которого есть значения функции  $\rho(z)$  на границах интервалов разбиения отрезка  $[-z_0; z_0]$ ,  $x_i = \rho$ ,  $i = 1 \dots n+1$ ;  $A$  — матрица размера  $m \times n$ , элементы которой определяются следующим образом;

$$a_{j,1} = \left(1 + \frac{z_1}{h}\right) \int_{z_1}^{z_2} k_j(z) dz - \frac{1}{h} \int_{z_1}^{z_2} z k_j(z) dz;$$

$$a_{j,i} = \frac{1}{h} \int_{z_{i-1}}^{z_i} (z - z_{i-1}) k_j(z) dz + \int_{z_i}^{z_{i+1}} \left(1 - \frac{z - z_i}{h}\right) k_j(z) dz;$$

$$a_{j,n+1} = \frac{1}{h} \int_{z_n}^{z_{n+1}} z k_j(z) dz - \frac{z_{n+1}}{h} \int_{z_n}^{z_{n+1}} k_j(z) dz,$$

$$z_1 = -z_0; z_{n+1} = z_0; h = z_i - z_{i-1} = \text{const.}$$

Рассмотрим иллюстрацию проведенного анализа расшифровки ЭСО на примере решения тестовой задачи. Для этой цели задавалось распределение  $\rho(z)$  и решалась прямая задача определения напряженности поля в точках расположения датчиков. При этом использовались функции  $\rho(z)$  вида

$$\rho_1 = 10^{-10} \left| \pi \frac{z}{z_0} \right| \sin \frac{z}{z_0}, \text{ Кл/м}^3; |z| \leq z_0;$$

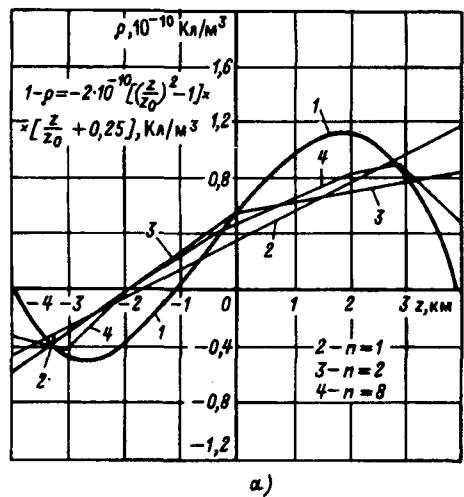
$$\rho_2 = -2 \cdot 10^{-10} \left[ \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 - 1 \right] \left[ \frac{z}{z_0} + 0,25 \right], \text{ Кл/м}^3.$$

Затем с помощью датчика случайных чисел в рассчитанные значения напряженности вносился шум, причем его относительная погрешность не превышала 10%, а абсолютная — 130 В/м. После чего проводилось восстановление ЭСО.

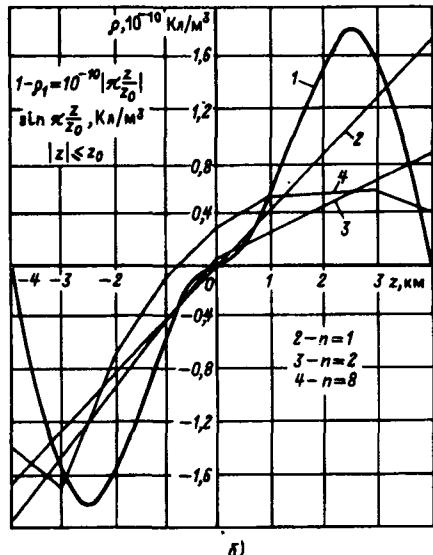
Анализ показал, что при указанных выше геометрии расположения датчиков и облака и уровне погрешностей в измерении напряженности электрического поля эффективный ранг матрицы А системы (1) равен 2. Это означает, что только лишь два уравнения из десяти (что соответствует числу датчиков) эффективно линейно независимы. Информация от остальных восьми датчиков, хотя и участвует в обработке, но не позволяет получить более детальную структуру, чем та, которая определяется векторами основных составляющих.

Результаты восстановления ЭСО для исходных

функций  $\rho(z)$  при различных  $n$  приведены на рис. 2. Из указанных графиков следует, что при точном определении с помощью МРЛ пространственной области, занимаемой объемным зарядом, точность расшифровки удовлетворительна при оптимальном  $n_{\text{опт}} = 8 \div 10$ . При  $n=1$  точно отражается четность, нечетность и асимметричность исходной функции  $\rho(z)$ .



a)



б)

Рис. 2. Результаты расшифровки электрической структуры облака

Увеличение числа  $n$  по сравнению с  $n_{\text{опт}}$  не приводит к улучшению результатов расшифровки, поскольку в этом случае число  $n$  становится чисто формальным параметром и его увеличение не увеличивает информативности относительно решения  $\hat{x}$ .

Задача расшифровки ЭСО решается с применением сингулярного разложения, основные сведения о котором изложены в [5–7].

**Анализ возможностей модели.** Анализ этих возможностей проведем путем сравнения результатов расшифровки ЭСО и определения напря-

женности электрического поля около облака, выполненного как по точечной модели [3], так и по моделям с объемным зарядом.

Анализ включал следующие этапы.

1. Задавались геометрические параметры области, занимаемой облаком:  $x_0; y_0; z_0; h$ .

2. Задавалось одномерное распределение плотности объемного заряда в облаке  $\rho(z)$ .

3. Рассчитывалось распределение составляющих вектора напряженности электрического поля, созданного облаком, в которой пространственной области, а именно, на прямых  $x_p=0; y_p=\text{const}, z_p=\text{var}$ , где  $\{x_p; y_p; z_p\}$  — координаты расчетной точки  $p$ .

Расчет составляющих вектора напряженности электрического поля с учетом сил зеркального отображения выполнялся с использованием соотношений, описывающих модель с объемным зарядом.

Вводились значения напряженности поля с наложенным шумом.

4. По расчетным программам определялись параметры двухзарядной дипольной модели — координаты  $x, y, z$ , заряды  $Q$  на основании которых рассчитывались значения составляющих вектора напряженности в тех же точках, что в п. 3.

5. Осуществлялось определение одномерно распределенной плотности объемного заряда.

6. На основании данных п. 5 выполнялся расчет составляющих вектора напряженности в указанных в п. 3 точках.

7. Производилось сравнение результатов, полученных в пп. 3, 4, 6, 7, при этом определялась относительная погрешность расчета модуля вектора напряженности  $\Delta E$ .

В качестве иллюстрации приведены результаты расчетов в точках на прямых  $x_p=0, y_p=\text{const}$ , для дипольной модели п. 4 и для модели с объемным зарядом с исходной плотностью заряда  $\rho=f(z)$ , указанной выше. Расчеты выполнены для облака с размерами  $x_0=y_0=z_0=1$  км,  $h=4,5$  км при различных  $y_p$ .

Анализ данных, полученных при решении этой тестовой задачи (приведены на рис. 3), свидетельствует о значительном (в 7–8 раз) снижении погрешности расчета модуля вектора напряженности поля при использовании даже самой грубой аппроксимации ( $n=1$ ) распределения объемного заряда.

**Заключение.** Оценки, полученные с помощью тестовых задач, показали, что максимальная погрешность при расчете напряженности электрического поля вокруг облака с использованием дипольной модели не превосходит 45%, а даже грубый учет распределения объемного заряда ( $n=1$ ) позволяет снизить реальную погрешность

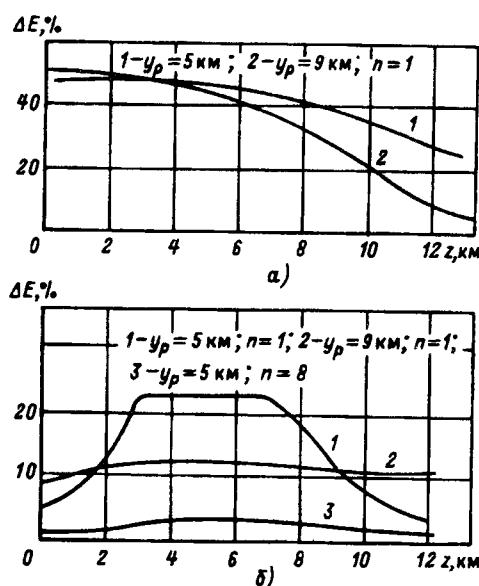


Рис. 3. Зависимость погрешности от расстояния для дипольной (а) и объемной (б) модели

более чем вдвое.

Использование в предложенной модели более точной аппроксимации объемного заряда (до  $n_{\text{опт}}$ ) приводит к увеличению точности расчета поля около облака.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kasemir H.W. The Thunderstorm Problems of Atmospheric and Space Electricity. Amsterdam: Elsevier, 1965.
2. Jacobson E.A., Krider E.P. Electrostatic Field Changes Produced by Florida Lightning. — J. Atmos. Sci., 1976, vol. 33, № 1.
3. Кириленко И.И. Методика определения электрической структуры кучево-дождевых облаков. — М.: ЭНИН 1985. Деп. в ИЦ ВНИГМИ МЦП 06.06.85, № 408ГМ-Д85.
4. Михайловский Ю.П. Электризация конвективных облаков (Полевые самолетные исследования): Автореф. дис.Л: Главная геофизическая обсерватория, 1990.
5. Стрэнг Г. Линейная алгебра и ее применение. — М.: Мир, 1980.
6. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач методом наименьших квадратов. — М.: Наука, 1986.
7. Форсайт Д., Малькольм М., Моулдер К. Машинные методы математических вычислений. — М.: Мир 1980.

[24.12.92]

**Авторы:** Орлов Александр Васильевич окончил факультет автоматики и вычислительной техники Московского энергетического института (МЭИ) в 1976 г. В 1991 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Расшифровка электрической структуры заряженных облаков» в МЭИ. Старший научный сотрудник кафедры техники высоких напряжений МЭИ.

Петухов Виктор Сергеевич окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1979 г. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в МЭИ. Заведующий отделом научно-исследовательских работ Научно-инженерного центра электронно-ионной технологии.

# **Математическое обеспечение подсистемы оперативно-информационного управляющего комплекса для энергосистем**

**УНАРОКОВ А.А.**

*Дается техническая характеристика версии первой очереди математического обеспечения информационно-вычислительной подсистемы, базирующейся на IBM совместимых персональных ЭВМ.*

Решающая роль в интегрировании в единое целое всего комплекса технических средств автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ), реализации собственно функций управления отводится математическому обеспечению (МО) информационно-вычислительной подсистемы (ИВП) оперативно-информационного управляющего комплекса (ОИУК) АСДУ [1, 2]. Математическое обеспечение должно включать всю технологическую цепь, начиная с подготовки исходных данных и кончая анализом результатов расчетов, строиться на рациональном разнесении вычислений во времени и между отдельными программными продуктами, удовлетворять жестким требованиям по быстродействию, требуемой памяти, точности и устойчивости результатов расчетов.

Рассматриваемая версия МО разработана для ИВП, базируемой на персональных ЭВМ, совместимых с IBM PC, является развитием описанной в [3] и допускает: поэтапное внедрение задач; подключение новых комплексов программ (КП) по мере их разработки; преемственность и совместимость разных версий.

Математическое обеспечение — это совокупность баз данных, программное обеспечение (ПО) и математическая модель электрической системы вместе с кодировкой расстановки телеметрии (ТИ), телесигнализации (ТС) и схемами хранения используемых разреженных матриц. Отдельные компоненты ПО взаимодействуют через единую модель электрической системы, подстраиваемую под внешние условия за счет:

коррекции кодировки расстановки ТИ и ТС, текущих значений ТИ, ТС и параметров элементов электрической системы в реальном времени (адаптивный контур);

оперативной коррекции вручную расстановки ТИ, значений ТС и параметров элементов электрической системы;

ручной (вне реального времени) коррекции данных на любом уровне предусмотренной иерархии исходных данных.

Распределение исходных данных между подсистемами ОИУК, их подготовка и хранение организуются таким образом, чтобы максимально облегчить работу пользователя, наиболее полно

*Technical characteristics of the first phase version software in an information computational subsystem based on IBM compatible personal computers are given. The complex is designed for operating large power systems.*

использовать имеющуюся в информационно-управляющей подсистеме (ИУП) нормативно-справочную информацию и построить адаптивную математическую модель режима в реальном времени, и, кроме того, ввести жесткую адресацию результатов расчетов для отображения их на дисплеях с использованием форматов.

Имеющаяся на ЭВМ ИУП нормативно-справочная информация дополняется кодировкой расстановки ТИ и ТС, а на ЭВМ ИВП создается единая для МО база данных. Способы задания отдельных элементов, представления схем замещения и схем электрических соединений достаточно гибки и универсальны и допускают:

упрощенное и детальное представление схемы замещения;

упрощенное и детальное представление схем электрических соединений;

любые сочетания представлений схемы замещения и схемы электрических соединений расчетного узла;

физическое и мнимое удаление элементов из базы данных (элемент не учитывается при формировании расчетной схемы, но сохраняется в базе данных); .

установку измерительного датчика в произвольной точке схемы замещения до (после) параллельной проводимости ветви.

База данных рассматривается как автономная, локальная, открытая система, допускающая поэтапное накапливание и расширение исходных данных по мере освоения задач и подключения новых КП. Независимость МО от структуры и содержания базы данных достигается использованием двух баз данных: основной (форматные записи), рабочей (бесформатные записи). Из основной базы данных в рабочую копируется необходимая информация.

Исходные данные различных ЭВМ формируются независимо: на ЭВМ ИУП нормативно-справочная информация располагается в произвольной последовательности; результаты расчетов на ЭВМ ИВП представляются в виде массивов, причем каждой величине отводится жестко фиксированный адрес.

Связь между исходными данными различных ЭВМ, исходными данными и данными, отобра-

жаемыми на различные виды терминалов, устанавливается с помощью таблицы соответствия.

Таблица соответствия формируется на ЭВМ ИВП на подготовительном этапе, который условно называется формированием эталонной расчетной схемы. На этом этапе выполняется наиболее трудоемкая часть расчетов, не требующая вычислений в реальном времени: обслуживание баз данных, выбор и просмотр произвольной информации о расстановке ТИ и ТС, проверка правильности подготовки исходных данных, реализация принципов оптимального упорядочения, формирование расчетной схемы, определение местоположения ненулевых элементов и упаковка разреженных матриц.

Программная проверка правильности подготовки исходных данных (представление чисел, соответствие последовательности чисел определенному элементу расчетной схемы, допустимые отношения и предельные значения параметров системы и режима, соответствие классов напряжений, связность графа электрической сети, расстановка ТИ по условию полноты математической модели режима, соответствие кодировки расстановки ТИ, ТС и расчетной схемы, связность узла расчетной схемы по исходным (эталонным) значениям ТС, контроль текущих размерностей массивов и т.п.) осуществляется автоматически при формировании эталонной расчетной схемы.

Предусмотрена возможность одновременного хранения десяти эталонных расчетных схем, отражающих наиболее характерные схемы электрических соединений и учитывающих ввод новых объектов и устройств телемеханики. С этой целью создана база расчетных схем. При решении предусмотренных задач одна из эталонных расчетных схем (рабочая расчетная схема) копируется из базы расчетных в рабочие файлы. Для моделирования, анализа и хранения режимов создана база режимов (до 12 режимов). Предусмотрена возможность записи произвольного режима, являющегося результатом решения одной из задач, в базу режимов.

Все расчеты, включая и формирование отображаемых на дисплеях кадров, производятся на ЭВМ ИВП. В ИВП передаются текущие ТИ и ТС циклически или (и) спорадически, информация о местоположении устройств телемеханики посыпается только по запросу; в обратном направлении передаются отображаемые на дисплеях кадры.

Однозначное соответствие между данными различных ЭВМ обеспечивается кодировкой расстановки ТИ, ТС и использованием «позиционности». Указанное соответствие не меняется (оно может дополняться) при вводе новых объектов и устройств телемеханики. Таблица соответствия

данных, каталог и вид кадров, выводимых на дисплеи, формируются на ЭВМ ИВП.

Программное обеспечение представляет собственную инструментальную среду, в которой сочетается автоматический режим работы в реальном времени с интерактивным дружественным характером пользовательского интерфейса. В последнем случае широко используются интерфейсы в стиле разветвленных иерархических меню с указанием всего набора альтернативных вариантов выбора действий в текущем состоянии и способов их инициирования, с развитой диагностикой ошибочных ситуаций. Всевозможные подсказки и сообщения, которые вызываются нажатием функциональных клавиш, значительно облегчают интерпретацию возникающих в процессе работы ситуаций и выбор пользователем адекватного действия.

В состав ПО входят следующие комплексы программ:

**КОМПОНОВЩИК** расчетных схем;  
**НАСТРОЙЩИК** программного обеспечения;  
**СОВЕТЧИК** диспетчера;  
**ДУБЛЕР** (просмотр текущей информации);  
**ПОСТРОИТЕЛЬ** базовых режимов;

**ПЛАНИРОВЩИК Q** (оптимизация режима электрической сети);

**КОРРЕКТОР** (идентификация параметров элементов электрической системы).

Комплекс программ **КОМПОНОВЩИК** представляет сервис-оболочку без данных МО ИВП и предназначен для облегчения и ускорения процесса подготовки и отладки исходных данных, создания и поддержания основных баз, реализации всех трудоемких расчетов, не связанных с вычислениями в реальном времени.

Комплекс поддерживает единый стиль диалога с пользователем путем использования стандартного набора функциональных и управляющих клавиш, имеет достаточный набор подсказок и подменю, существенно упрощающих его освоение и работу.

Комбинирование параметров в любом сочетании, совместный анализ параметров различных элементов, классификация параметров по группам, программное обнаружение ошибок и автоматический поиск источника ошибки предоставляют пользователю гибкие возможности и значительно облегчают наиболее тяжелый и трудоемкий процесс подготовки и отладки исходных данных.

**КОМПОНОВЩИК** является базовым комплексом ПО, обеспечивает взаимную увязку всех данных ИУП и ИВП, формирует единую математическую модель электрической системы для всех решаемых задач.

В процессе компоновки расчетной схемы вы-

полняется наиболее трудоемкая часть расчетов, не требующая вычислений в реальном времени (реализация принципов оптимального упорядочения; формирование собственно математической модели электрической системы; имитация исключения Гаусса, определение местоположения ненулевых элементов и формирование схем хранения используемых разреженных матриц; формирование и упаковка вспомогательных массивов, обеспечивающих высокую вычислительную эффективность реализованных алгоритмов). Именно на этом этапе производится основная программная проверка правильности подготовки исходных данных.

Комплекс программ НАСТРОЙЩИК предназначен для оценки состояния ЭЭС на основе многоступенчатой диагностики достоверности и отсева ошибочных ТИ, коррекции вручную структуры информационно-измерительной сети, схемы электрических соединений и априорных данных, накопления статистических данных о достоверности ТИ. Все расчеты ведутся в диалоговом режиме; имеется возможность корректировки и ввода данных.

Оценка состояния ЭЭС производится для любой из десяти расчетных схем, формируемых предварительно КП КОМПОНОВЩИК, с использованием ТИ и ТС одного из следующих источников:

любой файл ИВП с предварительно записанными значениями ТИ и, быть может, ТС;

данные из архива ИУП, получаемые программой файлового обмена;

текущие ТИ и ТС, получаемые программой файлового обмена из ИУП.

Реализованный в КП алгоритм при наличии определенной избыточности измерений предусматривает возможность обнаружения и замены расчетными значениями ошибочных ТИ, что позволяет повысить точность оценивания. Выбор режима досчета ТИ предоставляется пользователю.

Необходимость в выборе режима коррекции ТС возникает только в том случае, когда используется расчетная схема, сформированная с учетом расстановки ТС. Телесигналы получаемые из ИУП, могут быть оперативно скорректированы, что равносильно оперативной коррекции рабочей расчетной схемы.

При анализе результатов оценки состояния ЭЭС в случае необходимости можно получить полную информацию о ТИ: что измеряется; место установки; измеренное и расчетное значения; статистические данные (дата, начиная с которой накапливаются данные; максимальная и средняя погрешность измерения; число достоверных, сомнительных, ошибочных замеров, а также выбросов за время наблюдений); состояние (учитывается, не учитывается). Можно имитировать включение-отключение датчика ТИ; тем самым оперативно корректируется расстановка ТИ для последующих расчетов.

Предоставлена возможность оперативной коррекции априорных данных. Изменять можно только те данные, которые априори задавались при формировании расчетной схемы (дополнение или исключение априорных данных не предусмотрено).

Комплекс программ СОВЕТЧИК предназначен для оценки состояния ЭЭС на основе многоступенчатой диагностики достоверности и отсева ошибочных ТИ и оптимизации режима электрической сети в реальном времени, подготовки для диспетчера достоверной информации о текущем режиме, схеме электрических соединений и рекомендаций по ведению оптимального режима.

Оценка состояния ЭЭС и оптимизация режима электрической сети производятся по текущим ТИ и ТС для любой из десяти расчетных схем, формируемых предварительно КП КОМПОНОВЩИК. По существу используется адаптивная математическая модель электрической системы: адаптивность обеспечивается как за счет коррекции состава и значений ТИ и ТС и, следовательно, самой расчетной схемы, так и за счет коррекции параметров ветвей по результатам идентификации. Расчетная схема корректируется по результатам идентификации по желанию пользователя с помощью КП КОРРЕКТОР, в последующем это будет производиться автоматически КП СОВЕТЧИК.

Комплекс программ рассчитан на циклическое выполнение; длительность одного цикла, в основном, определяется скоростью файлового обмена и загрузкой ИУП. Выходные данные, передаваемые в ИУП, формируются в виде файла, структура его (массив оценочных мощностей, массив оцененных напряжений, массив обобщенной информации) подробно расшифровываются в выходных документах КП КОМПОНОВЩИК (таблица соответствия, каталог кадров).

Результаты оценки состояния ЭЭС и оптимизации режима электрической сети записываются в файл, используемый КП ДУБЛЕР при просмотре данных, передаваемых в ИУП. После каждого цикла ТИ сортируются с учетом результатов диагностики их достоверности — формируются данные для КП КОРРЕКТОР

Комплекс программ ДУБЛЕР предназначен для просмотра (дублирования) информации, передаваемой в ИУП и отображаемой на дисплей диспетчера.

Основная функция КП — это анализ в диалоговом режиме результатов оценки состояния ЭЭС и оптимизации режима электрической сети в реальном времени.

Комплекс программ ПОСТРОИТЕЛЬ предназначен для моделирования, расчета и анализа произвольных стационарных режимов ЭЭС; может быть использован для проверки допустимости теку-

щего и планируемых режимов, при разрешении заявок на вывод в ремонт основного силового оборудования электрических станций, сетей, подстанций. В зависимости от выбранного базового режима имеется возможность оценки состояния ЭЭС по текущим ТИ или данным ретроспективы без учета ТС, расчета установившегося режима, обработки данных режимного дня (контрольных замеров); особенность последней возможности состоит в том, что осуществляется балансировка режима с учетом контрольных данных из диспетчерской ведомости, включая и данные в балансирующем узле.

Все расчеты ведутся в диалоговом режиме; имеется возможность корректировки и ввода данных.

Комплекс программ ПЛАНИРОВЩИК Q предназначен для моделирования, расчета, оптимизации и анализа произвольных стационарных режимов; может быть использован при планировании режимов.

Все расчеты ведутся в интерактивном режиме; имеется возможность корректировки и ввода данных. Необходимая для расчетов информация хранится на накопителе на жестком магнитном диске. Данные, вводимые с клавиатуры, используются для коррекции уже имеющихся в оперативной памяти ПЭВМ.

В процессе оптимизации режима электрической сети учитываются двусторонние ограничения на реактивные мощности в генераторных узлах, коэффициенты трансформации автотрансформаторов с РПН и напряжения в узлах. Диапазоны регулирования реактивных мощностей в генераторных узлах определяются автоматически (программно), остальные ограничения задаются при подготовке исходных данных с помощью КП КОМПОНОВЩИК.

Комплекс программ КОРРЕКТОР предназначен для идентификации параметров элементов электрической системы и коррекции ее математической модели в интерактивном режиме.

Все расчеты, связанные с собственно идентификацией, ведутся в автоматическом режиме. Идентификация параметров элементов рабочей расчетной схемы осуществляется с использованием информативных наблюдений, накопленных за определенный интервал времени КП СОВЕТЧИК.

Интервал времени накопления информативных наблюдений задается на этапе формирования расчетной схемы КП КОМПОНОВЩИК.

Заключительная фаза КП КОРРЕКТОР работает в интерактивном режиме. Предусмотрена возможность ручной коррекции параметров идентифицируемых ветвей; необходимость в такой операции возникает в ряде случаев и вызвана тем, что точность идентификации различных параметров неодинакова. По этой же причине пользователь может самостоятельно назначить те идентифицируемые ветви, параметры которых учитываются при кор-

рекции расчетной схемы.

Математическое обеспечение создано с учетом жестких ограничений на точность расчетов, используемый объем оперативной памяти ЭВМ и время счета; в итерационных методах расчета гарантируется сходимость. Установлены следующие предельные возможности: 300 узлов, 400 ветвей, 2200 ТИ мощности, 300 ТИ напряжения, 3000 ТС.

В реальной энергосистеме (130 узлов, 180 ветвей, 350 ТИ мощности, 30 ТИ напряжения, 5 эквивалентных генераторов, 14 автотрансформаторов с РПН) временные затраты для РС АТ/386 (тактовая частота 33 МГц) составляют соответственно: оценка состояния энергосистемы — 4 с; оценка состояния энергосистемы с многоступенчатым обнаружением и отсевом плохих данных — 7 с; один шаг оптимизации режима электрической сети — 3 с; оптимизация режима электрической сети с учетом оценки на основе многоступенчатого обнаружения и отсева плохих данных — 10 с; расчет установившегося режима — 7÷10 с; идентификация параметров отдельной ветви — 0,2 с.

Математическое обеспечение апробировано на различных моделях ЭВМ (универсальных и персональных); рассматриваемая версия внедрена и эксплуатируется в Смоленской энергосистеме с 1991 г. Дальнейшее развитие предполагает передачу ИВП функций отображений результатов расчетов с использованием графика и псевдографики, подключение по мере разработки новых комплексов программ, в частности оперативного предсказания нагрузок в узлах и экстраполяции поведения энергосистемы в целом.

**Вывод.** Созданная версия первой очереди МО ИВП удовлетворяет характерным для задач реального времени жестким требованиям, отдельные программные продукты ее взаимодействуют через единую адаптивную математическую модель электрической системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация управления энергообъединениями/ Под ред. С.А. Соловьева — М.: Энергия, 1979.
2. Унароков А.А. Управление режимом энергосистемы в реальном времени. — М.: МЭИ, 1989.
3. Технологическое программное обеспечение оперативно-информационного комплекса энергосистемы/. И.Е.Митрофанов, С.П.Новиков, А.П.Титов, А.А.Унароков. — Энергетик, 1988, № 1.

[08.12.93]

*Автор: Унароков Аслан Аскарбиеевич окончил электротехнический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1972 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Принципы управления режимом энергосистемы в реальном времени» в МЭИ. Доцент кафедры электрических систем Смоленского филиала МЭИ.*

# Использование методологии экспертных систем для оценки состояния изоляции генераторов

КУЛАКОВСКИЙ В.Б., НАДТОЧИЙ В.М., ЗОЗУЛИНСКИЙ Е.Б.

В статье рассмотрена попытка формализации процедуры оценки состояния изоляции с помощью технологии экспертных систем. В экспертной системе ЭСТРИ моделируются «шаг за шагом» действия эксперта при обследовании изоляции обмотки статора гидрогенератора. Система выполняет логический анализ результатов обследования, устанавливает причины обнаруженных неисправностей и дает рекомендации для обслуживающего персонала. При наличии статистических данных ЭСТРИ вырабатывает прогноз о возможных развитиях неисправностей.

Одним из основных элементов, определяющих надежность генераторов, является изоляция обмотки статора. В крупных генераторах изоляция работает в условиях значительных рабочих воздействий, особенно электрических и механических. Вследствие этого нерасчетные воздействия на изоляцию со стороны как токоведущей части обмотки, так и прилегающих или близлежащих элементов генератора вызывают появление дефектов, которые в дальнейшем могут развиваться и под влиянием рабочих воздействий. Некоторые дефекты возникают на стадии укладки или ремонта обмотки из-за нарушения технологии, встречаются дефекты изготовления изоляции [1].

Большое число причин появления дефектов и недостаточность средств для своевременного выявления динамики их развития затрудняет оценку фактического состояния изоляции. Даже в ситуациях, когда дефект развился до повреждения, трудно определить причину его возникновения.

Опыт показывает, что наиболее достоверно состояние изоляции может быть оценено путем совместного анализа результатов испытаний, измерений различных характеристик изоляции, осмотров и условий ее эксплуатации. Такой анализ, как правило, может быть выполнен только высококвалифицированным специалистом-экспертом.

Значение и актуальность такого анализа подчеркивается тем, что многие организации в разных странах прямо или косвенно занимаются проблемой выявления неисправностей изоляции с помощью контроля и измерений, изучением процессов возникновения неисправностей, совершенствованием технического обслуживания обмотки статора. Следует отметить, например, разработку фирмой ABB (Швейцария) экспертной системы диагностики изоляции электрических машин,рабатывающей гипотезы о состоянии обмотки на основе анализа динамики изменения результатов традиционных и специальных изме-

*Insulation condition evaluation is a hardly formalized procedure since present diagnostic methods are not enough informative. This article deals with an attempt to formalize procedure of insulation condition evaluation using expert system technique. Expert actions during stator winding insulation inspection are simulated «step-by-step» in expert system ESTRI, which makes logic analysis of inspection data, detects fault causes and provides recommendations for maintenance staff. When statistic data are sufficient ESTRI provides broadcast about possible evolution of detected faults.*

рений, а также с использованием результатов профилактических осмотров [2]. Вопросами выявления дефектов изоляции занимаются и другие крупные фирмы [3], в США выпущен справочник по определению состояния изоляции вращающихся машин [4].

В этом направлении ВНИИЭ проводит исследования, в частности в рамках тематики по созданию экспертных систем-советчиков для обслуживающего персонала ГЭС. Создана действующая модель экспертной системы ЭСТРИ для оценки эксплуатационного состояния термореактивной изоляции обмотки статора гидрогенератора.

Модель ЭСТРИ построена по модульному принципу и состоит из пяти независимых модулей:

1. «Увлажнение» — для оценки степени увлажненности изоляции по резкому снижению сопротивления изоляции обмотки статора.

2. «Истирание» — для анализа признаков истирания изоляции лобовых частей обмотки статора.

3. «Озон» — для анализа причин возникновения повышенного содержания озона в охлаждающем воздухе.

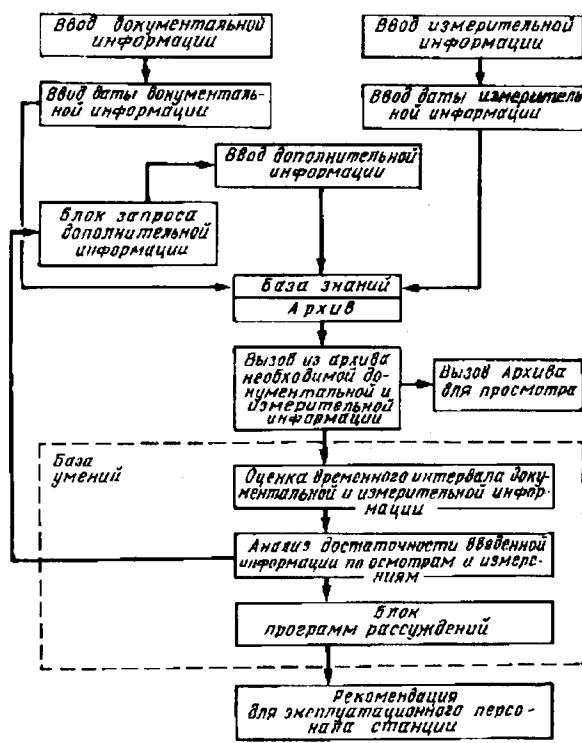
4. «Пробой» — для установления причин пробоя стержня во время профилактических испытаний (с разборкой стержня).

5. «Осмотр» — для анализа результатов профилактического обследования гидрогенераторов с воздушным и водяным охлаждением.

Система предназначена для оказания консультационной помощи персоналу станции, выполняющему профилактическое обслуживание и ремонт изоляции обмотки статора и поэтому сформирована как диагностическая диалоговая система с ручным вводом информации.

На рисунке представлена общая структурная схема ЭСТРИ.

Модель ЭСТРИ рассчитана на использование



двух видов информации: измерительной (числовой) и документальной (текстовой) и обеспечивает следующую последовательность действий.

Документальная и измерительная информация вводится с записью даты проведения осмотров и измерений, после чего вся полученная информация передается в архив базы знаний.

Архив используется для накопления и хранения как измерительной, так и документальной информации. Для удобства работы с архивом предусмотрен вызов архива для просмотра. В любой момент времени пользователь может получить имеющуюся в архиве информацию о генераторе. Для выработки рекомендации система вызывает из архива необходимую документальную или измерительную информацию. После этого проводится оценка временного интервала от момента последнего ввода данных по осмотрам и измерениям до настоящего момента для определения необходимости проведения дополнительных осмотров или измерений.

Если временной интервал не превышает заданную величину, то проведения новых осмотров или измерений не требуется, и в этом случае система проводит анализ достаточности введенной информации в экспертную систему. Если информации не хватает для выработки рекомендации, то запрашивается дополнительная информация. После ввода дополнительной информации в ЭВМ и работы блока программ-рассуждений экспертная система вырабатывает соответствующую рекомендацию. База знаний отражает проблемную область и содержит в себе всю ин-

формацию, необходимую для работы экспертной системы.

В качестве примера рассмотрим один из модулей ЭСТРИ, именуемый «Осмотр». Конкретной технологической задачей был выбран анализ причин возникновения характерных неисправностей изоляции обмотки статора, которые обнаруживаются при профилактических обследованиях обмотки статора гидрогенераторов с воздушным или водяным охлаждением, и выработка соответствующих рекомендаций для эксплуатационного персонала станции.

Следует отметить, что осмотр является особенно важным элементом системы диагностики изоляции электрических машин, поскольку, по имеющимся данным, с его помощью выявляется дефектов больше, чем с помощью испытаний и измерений. Целый ряд опасных дефектов, таких как истирание, повреждение посторонним предметом, течи в элементах системы водяного охлаждения обмотки в начальной стадии их развития, выявляется в основном с помощью осмотров.

Вместе с тем, осмотр является одной из наиболее трудно формализуемых операций по диагностике изоляции. Экспертная система использует перечень наиболее характерных неисправностей, которые по опыту эксплуатации могут быть обнаружены при осмотре. Так, например, предполагается, что при осмотре места выхода обмотки из паза могут быть обнаружены следующие следы неисправностей: механические повреждения полупроводящего покрытия и изоляции, в том числе — углубление в изоляции с гладкими краями, пыль (серая, красная или бурая), выплызание подклиновых прокладок или клиньев и т.д. В базу знаний ЭСТРИ заложен перечень подобных неисправностей по десяти элементам обмотки и частично — по активной стали гидрогенераторов.

В качестве информационной базы разработанной версии ЭСТРИ «Осмотр» используются результаты текущих профилактических осмотров.

Входные параметры экспертной системы включают в себя данные об объекте осмотра и все неисправности, обнаруженные при каждом профилактическом осмотре гидрогенератора.

В виде дополнительной информации в базу знаний заложены:

результаты специальных испытаний изоляции обмотки статора;

данные измерений (например, информация об уровне вибрации тех мест, где обнаружена та или иная неисправность);

сведения о возможных неисправностях других узлов генератора, которые могут оказать влияние на состояние изоляции;

количественная и качественная характеристики неисправностей (глубина истирания изоляции, число стержней с «прогоревшими дорожками» и т.д.);

условия проведения осмотра (при снятых щитах без снятия полюсов или при снятых щитах и снятых одном или нескольких полюсах).

Общая последовательность действия разработанной модели экспертной системы соответствует описанной выше, однако в реализованной демонстрационной версии используется документальная информация, не организованная в виде отдельного архива, а вводимая непосредственно в базу знаний.

В данной версии в соответствии с логикой эксперта рекомендации вырабатываются для каждой отдельной неисправности и не зависят от наличия других неисправностей и их количества.

Демонстрационная модель экспертной системы предусматривает для эксплуатационного персонала станции около сорока различного рода рекомендаций. Можно привести примеры некоторых из них:

уплотнить стержень в пазу боковыми полупроводниковыми прокладками;

очистить лобовые части с применением моющих средств;

снять изоляцию с места пайки, перепаять; восстановить крепления кольцевых шин; провести переклиновку.

Для каждой рекомендации указывается наиболее вероятная причина возникновения неисправности.

Некоторые неисправности в данной экспертной системе связаны с другими упомянутыми модулями ЭСТРИ, причем рекомендации по таким ситуациям имеют следующий вид:

«Для получения рекомендации по объекту «поверхность изоляции лобовых частей» и неисправностей «ослабление» необходимо включить в работу модуль ЭСТРИ «Истирание».

В основу разработки алгоритмов данной экспертной системы ЭСТРИ «Осмотр», исходя из знаний эксперта, были положены алгоритмические цепочки логических выводов типа «Если ..., То ...».

Эти правила имеют вид:

«Если имеются «следы перегрева» на головке и если уровень вибрации нормальный, то вероятная причина — дефект выполнения пайки».

Рекомендация для этого случая имеет вид: «Рекомендуется снять изоляцию с места пайки и перепаять».

В аналогичном случае, но при повышенном уровне вибрации, правило имеет вид:

«Если имеются «следы перегрева» на головке и если уровень вибрации повышенный, то ве-

роятная причина появления «следов перегрева» — повышенный уровень вибрации».

Рекомендация при этом предусматривает возможность включения в работу экспертной системы вибрационного контроля ВИБРЭКС:

«Рекомендуется найти причину повышенного уровня вибрации (вход в экспертную систему ВИБРЭКС) и устраниТЬ ее. Снять изоляцию с места пайки и перепаяТЬ».

Экспертная система ЭСТРИ обеспечивает обработку большого числа различных ситуаций. Например, модуль «Осмотр» рассматривает около ста различных ситуаций. Можно считать, что число ситуаций в данном случае равно числу правил.

Разработанные модули ЭСТРИ демонстрировались персоналу ряда ГЭС и вызвали очевидную заинтересованность. Модули могут использоваться в качестве самостоятельного коммерческого продукта и быть адаптируемыми к требованиям заказчика, однако наиболее эффективным является применение полной экспертной системы ЭСТРИ, использующей всю совокупность измерительных и документальных данных «истории жизни» обмотки статора гидрогенератора за весь период его эксплуатации. Такая система находится в завершающей стадии разработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах. — М.: Энергоиздат, 1981.
2. Schuier R. Methods for evaluating the condition of winding of rotating electrical machines. — CIGRE Colloquium, montreal, 1989.
3. Fenton R.E., Gott B.E.B., Mongan C.V. Preventive maintenance of turbine-generator stator windings.— IEEE Trans. on Energy Conversation, 1992, V.7, № 1.
4. Hadbook to assess the insulation condition of large rotating machines. rep. EPRI EL 5036, 1989.

[04.02.93]

*Авторы: Кулаковский Виктор Борисович окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1940 г. по специальности «Электрооборудование промышленных предприятий». В 1952 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Емкостные методы контроля влажности изоляции». Старший научный сотрудник Научно-исследовательского института электроэнергетики (ВНИИЭ).*

*Надточий Виктор Михайлович окончил электротехнический факультет МЭИ в 1957 г. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию «Механические проблемы роторов турбогенераторов» в Тбилисском политехническом институте. Заведующий сектором ВНИИЭ.*

*Зозулинский Евгений Борисович окончил электротехнический факультет МЭИ в 1988 г. Работает в Российском акционерном обществе «ЕЭС России».*

# Регулируемый многофазный источник питания

МАРТЫНОВ А.А., ХРУЩЕВ В.В.

Рассматривается регулируемый многофазный источник питания с использованием последовательно соединенных дросселя и трансформатора с вращающимся магнитным полем. Регулирование выходного напряжения производится путем изменения индуктивных сопротивлений дросселя и трансформатора при подмагничивании их ярма постоянной магнитодвижущей силой. Приводится методика расчета регулировочной характеристики и выполнено сравнение с экспериментальными данными.

Для различного рода электромеханических и полупроводниковых преобразователей энергии (выпрямителей, инверторов, вторичных источников питания, имитаторов систем электроснабжения и т.п.) широко применяются регулируемые многофазные источники питания с использованием дросселей и трансформаторов с вращающимся магнитным полем [1–3]. Мощности этих источников составляют от нескольких сотен ватт до десятков киловатт. Принципиальная электрическая схема такого источника приведена на рис. 1. Она состоит из последовательно включенных трехфазного дросселя и первичной обмотки трехфазного трансформатора, выполненных на магнитопроводах неявнополюсной асинхронной машины [4]. Вторичная обмотка трансформатора — многофазная ( $m_2=2, 3, 6, 9, 12$  в зависимости от назначения источника питания).

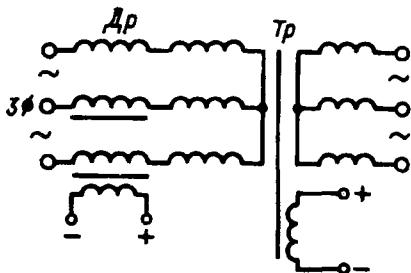


Рис. 1. Схема соединения обмоток дросселя и трансформатора с вращающимися магнитными полями

Выходное напряжение регулируется изменением индуктивных сопротивлений взаимоиндукции дросселя и трансформатора при подмагничивании их ярма постоянной МДС [5]. Рассмотрим зависимость выходного напряжения источника питания от МДС подмагничивания дросселя и трансформатора для распространенного случая активной нагрузки вторичной обмотки трансформатора.

Электрическая схема для одной фазы источника питания приведена на рис. 2.

Принятые обозначения:  $U_{dp}$ ,  $U_{tp}$ ,  $U_c$  — фазные значения напряжений на обмотках дросселя,

The controlled multiphase feed source containing series connected solenoid and rotative magnetic field transformer is considered. The output voltage control is performed with the help of the variation of the inductive impedance of solenoid and transformer when their yokes are magnetized by the permanent magnetomotive force. The control characteristic calculation method is produced; the comparison with the experimental data is fulfilled.

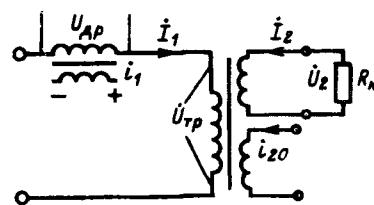


Рис. 2. Эквивалентная схема для одной фазы источника питания

трансформатора и питающей сети;  $I_1$  — фазное значение потребляемого тока;  $I_2, U_2$  — фазные значения тока и напряжения вторичной обмотки трансформатора;  $R_h$  — сопротивление нагрузки;  $i_1, i_2$  — токи намагничающих обмоток дросселя и трансформатора;  $x_{dp}, x_{tp}$  — индуктивные сопротивления взаимоиндукции фаз трехфазных обмоток дросселя и трансформатора;  $r=r_{dp}+r_1$  — суммарное значение активных сопротивлений фаз дросселя и первичной обмотки трансформатора;  $x_{sdp}, x_{s1}$  — индуктивные сопротивления рассеяния фаз дросселя и первичной обмотки трансформатора;  $x'_{s2}, r'_2$  — приведенные к первичной обмотке индуктивное сопротивление рассеяния и активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора;  $E_{tp}$  — фазное значение ЭДС первичной обмотки трансформатора;  $I'_2, R'_h$  — приведенные к первичной обмотке ток и сопротивление нагрузки вторичной обмотки.

Пренебрегая потерями в стали трансформатора, получаем схему замещения источника питания, изображенную на рис. 3. Соответствующая ей векторная диаграмма токов и напряжений приведена на рис. 4, где  $E_{dp}=I_1 x_{dp}$  — фазное значение ЭДС дросселя;  $x_s=x_{sdp}+x_{s1}$ ;  $U_0$  — фазное значение входного напряжения без учета падений напряжений на активных сопротивлениях.

Установим некоторые соотношения, вытекающие из векторной диаграммы. При  $x'_{s2} \ll r'_2 + R'_h$  значение  $\alpha_h$  — малая величина и  $\sin \alpha_h \approx \tan \alpha_h$ , следовательно,

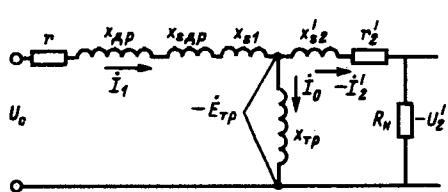


Рис. 3. Схема замещения источника питания с дросселем и трансформатором с вращающимися магнитными полями

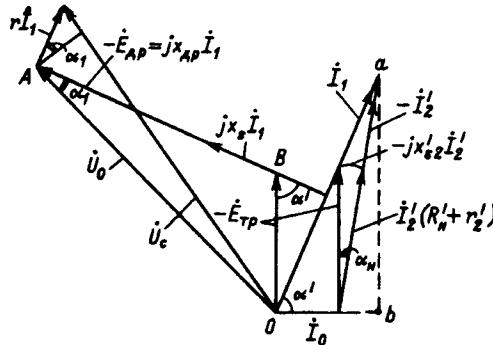


Рис. 4. Векторная диаграмма токов и напряжений схемы замещения, представленной на рис. 3

$$U'_2 = \frac{E_{tp}}{1 + \frac{r'_2}{R'_h}}; \quad (1)$$

$$\sin \alpha_h = \frac{x'_{s2}}{R'_h + r'_2} = \frac{x'_{s2}}{R'_h};$$

$$I'_2 = \frac{E_{tp}}{R'_h}; \quad (2)$$

$$U_0 = U_c - I_1 r \sin \alpha_1 = U_c - E_{tp} \frac{I_1 r}{U_0} \sin \alpha'$$

или

$$U_0^2 - U_c U_0 + I_1 r E_{tp} \sin \alpha' = 0,$$

отсюда при малых  $\frac{r'_1}{U_c}$

$$U_0 \approx U_c - \frac{r'_1}{U_c} E_{tp} \sin \alpha';$$

$$I_1 E_{tp} \sin \alpha' = E_{tp} I'_2 \cos \alpha_h \approx \frac{E_{tp}^2}{R'_h},$$

поэтому

$$U_0 = U_c \left( 1 - \frac{r}{R'_h} \frac{E_{tp}^2}{U_c^2} \right). \quad (3)$$

Из  $\Delta OAB$  и  $\Delta Oab$  имеем

$$U_0^2 = (x_{dp} + x_s)^2 I_1^2 + E_{tp}^2 + 2(x_{dp} + x_s) I_1 E_{tp} \cos \alpha';$$

$$I_1^2 = (I_0 + I'_2 \sin \alpha_h)^2 + (I'_2 \cos \alpha_h)^2 = I_0^2 + I'_2^2 + 2 I_0 I'_2 \sin \alpha_h;$$

$$\cos \alpha' = \frac{I_0 + I'_2 \sin \alpha_h}{\sqrt{I_0^2 + I'_2^2 + 2 I_0 I'_2 \sin \alpha_h}} = \frac{1 + \frac{I'_2}{I_0} \sin \alpha_h}{\sqrt{1 + \left(\frac{I'_2}{I_0}\right)^2 + 2 \frac{I'_2}{I_0} \sin \alpha_h}}. \quad (4)$$

Используя соотношения (2), получаем

$$\cos \alpha' = \frac{1 + \gamma}{1 + \left(\frac{x_{tp}}{R'_h}\right)^2 + 2\gamma}; \quad I_1 = \frac{E_{tp}}{x_{tp}} \sqrt{1 + \left(\frac{x_{tp}}{R'_h}\right)^2 + 2\gamma}, \quad (5)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{x_{tp}}{R'_h} \frac{x'_{s2}}{R'_h}.$$

Подставляя выражения (5) в (4), находим

$$U_0 = E_{tp} \left[ \left( 1 + \frac{x_{dp} + x_s}{x_{tp}} \right)^2 + \left( \frac{x_{dp} + x_s}{R'_h} \right)^2 + 2 \frac{(x_{dp} + x_s)x'_{s2}}{R'^2_h} \left( 1 + \frac{x_{dp} + x_s}{x_{tp}} \right) \right]. \quad (6)$$

Таким образом, используя соотношения (1), (3) и (6), окончательно получим зависимость выходного напряжения источника питания от индуктивностей  $x_{dp}$  и  $x_{tp}$  при заданном сопротивлении нагрузки  $R'_h$ :

$$U_c^2 \left[ 1 - \frac{r}{R'_h} \left( 1 + \frac{r'_2}{R'_h} \right) \left( \frac{U'_2}{U_0} \right)^2 \right] = U'_2^2 \left( 1 + \frac{r'_2}{R'_h} \right)^2 \times \\ \left[ \left( 1 + \frac{x_{dp} + x_s}{x_{tp}} \right)^2 + \left( \frac{x_{dp} + x_s}{R'_h + r'_2} \right)^2 + 2 \frac{(x_{dp} + x_s)x'_{s2}}{(R'_h + r'_2)^2} \times \right. \\ \left. \times \left( 1 + \frac{x_{dp} + x_s}{x_{tp}} \right) \right]. \quad (7)$$

Поскольку [5]  $x_{dp} = F_1(i_1)$  и  $x_{tp} = F_2(i_2)$ , то по формуле (7) можно рассчитать регулировочные характеристики источника питания  $U'_2 = F(i_1, i_2)$  при заданном  $R'_h$ .

Очевидно,  $U'_2 = U'_{2\min}$  при  $x_{dp} = x_{dp\max}$ ;  $i_1 = 0$ ;

$x_{tp} = x_{tp\min}$ ;  $i_2 = i_{2\max}$ ;

$U'_2 = U'_{2\max}$  при  $x_{dp} = x_{dp\min}$ ;  $i_1 = i_{1\max}$ ;

$x_{tp} = x_{tp\max}$ ;  $i_2 = 0$ .

Как правило, регулирование выполняется раздельно изменениями тока  $i_1$  и  $i_2$  (рис. 5).

На участке  $ab$  изменяется в основном параметр  $x_{tp}$  (значение  $x_{dp}$  изменяется в сравнительно узких пределах из-за насыщения магнитной системы при высоких  $U_{dp}$ ). Для его определения преобразуем уравнение (7). Введя безразмерные величины:

$$\frac{U_c}{U_2} = \alpha_c; \quad \frac{x_{dp} + x_s}{x_{tp}} = \beta_0; \quad a = \left( \frac{x_{dp} + x_s}{R'_h + r'_2} \right)^2 \left( 1 + 2 \frac{x'_{s2}}{x_{dp} + x_s} \right); \quad b = \\ = \frac{(x_{dp} + x_s)x'_{s2}}{(R'_h + r'_2)^2}; \quad \alpha_0 = \frac{\alpha_c}{1 + \frac{r'_2}{R'_h}} \sqrt{1 - \frac{r}{R'_h} \left( 1 + \frac{r'_2}{R'_h} \right) \frac{1}{\alpha_c^2}}, \quad (8)$$

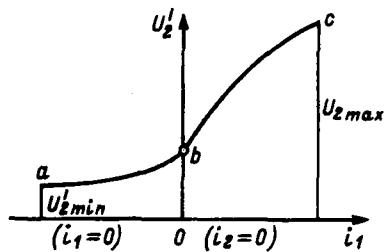


Рис. 5. Регулировочная характеристика источника питания

получим  $\alpha_0^2 = (1+\beta) + \sqrt{(1+b)^2 + \alpha_0^2 - a - 1}$ .

Решая это уравнение относительно  $\beta_0$ , находим

$$\beta_0 = -(1+\beta) + \sqrt{(1+b)^2 + \alpha_0^2 - a - 1}. \quad (9)$$

Можно рекомендовать следующий порядок расчета регулировочной характеристики на участке  $ab$  (индексом «1» обозначим величины, относящиеся к дросселю, индексом «2» — к трансформатору).

1. Задаемся  $U'_2 = I'_2 R'_H$ .

2. Определяем  $E_{tp} = U'_2 \left(1 + \frac{r'_2}{R'_H}\right)$ .

3. Находим  $B_{\delta 2} = \frac{pE_{tp}}{4,44fD_2 l_2 w_2 k_{062}}$ .

4. Определяем  $x_{dp}$  при  $i_1 = 0$ :  $x_{dp} = 6f\mu_0 \frac{D_1 l_1}{p^2} w_1^2 k_{061}^2$ .

5. Находим безразмерные параметры  $\alpha_0, a, b$  по формулам (8).

6. По формуле (9) определяем  $\beta_0$ .

7. Определяем  $x_{tp} = \frac{x_{dp} + x_s}{\beta_0}$ .

8. Находим  $\delta'_2$  по формуле

$$\delta'_2 = \frac{6f\mu_0 D_2 l_2 w_2^2 k_{062}^2}{p^2 x_{tp}}$$

и зазор, соответствующий намагниченному ярму  $\delta_{j2} = \delta'_2 - \delta_{20}$ , где  $\delta'_{20} = \delta_{20} + \delta_{2z}$  — сумма технологического зазора и зазора, соответствующего МДС зубцовного слоя.

9. Определяем ток подмагничивания ярма трансформатора [5]

$$i_2 = \frac{\delta_{j2} p B_{\delta 2}}{4 \cdot 10^{-7} w_{02} [\varphi(\beta_2 B_{\delta 2}) + \varphi(\beta'_2 B_{\delta 2})]},$$

где  $\varphi(z)$  — универсальная функция (рис. 6);  $\beta_2 = \beta \frac{D_2}{2ph_{j2} k_3}$ ;  $\beta'_2 = \beta' \frac{D_2}{2ph_{j2} k_3}$ ;  $k_3$  — коэффициент заполнения сталью пакета;  $\beta, \beta'$  — коэффициенты в зависимости  $H = \alpha \operatorname{sh} \beta B$  для внешнего и внутреннего ярма [5].

10. Находим значение  $E_{dp} = I_1 x_{dp}$ , где

$$I_1 = \frac{E_{tp}}{x_{tp}} \sqrt{1 + \frac{x_{tp}^2}{(R'_H + r'_2)^2} + 2 \frac{x_{tp} x_{s2}}{(R'_H + r'_2)}};$$

по величине  $B_{\delta 1} = \frac{pE_{dp}}{4,44fD_1 l_1 w_1 k_{061}}$  уточняем значение  $\delta'_{10} = \delta_{10} + \delta_{1z}$ , после чего, задавшись новым значением  $x_{dp}$ , повторяем расчет.

Приведенный порядок расчета весьма просто реализовать на ПЭВМ.

При расчете регулировочных характеристик на участке  $bc$  следует иметь в виду, что изменяется в широких пределах параметр  $x_{dp}$ , а значение  $x_{tp}$  практически постоянно.

Полагая  $\frac{I_1(x_{dp} + x_s)}{U_2} = a$ , уравнение (4) запишем

в виде

$$\left(1 + \frac{r'_2}{R'_H}\right)^2 \alpha_0^2 = a_1^2 + \left(1 + \frac{r'_2}{R'_H}\right)^2 + 2a_1 \left(1 + \frac{r'_2}{R'_H}\right) \times \times \frac{1 + \gamma}{\sqrt{1 + \frac{x_{tp}^2}{(R'_H + r'_2)^2} + 2\gamma}} \quad (10)$$

Решая (10) относительно  $a_1$ , получаем

$$a_1 = \left(1 + \frac{r'_2}{R'_H}\right) \left\{ \frac{-(1+\gamma)^2}{\sqrt{1 + \frac{x_{tp}^2}{(R'_H + r'_2)^2} + 2\gamma}} + \sqrt{\frac{(1+\gamma)^2}{1 + \frac{x_{tp}^2}{(R'_H + r'_2)^2}} + \alpha_0^2 - 1} \right\} \quad (11)$$

Отсюда вытекает следующий порядок расчета регулировочной характеристики на участке  $bc$ .

1. Задаемся  $U'_2 = I'_2 R'_H$  и находим  $\alpha_c = \frac{U'_2}{U_2}$

2. Определяем  $x_{tp} = 6f\mu_0 \frac{D_2 l_2}{p^2 \delta'_{20}} w_2^2 k_{062}^2$ ,

где  $\delta'_{20} = \delta_{20} + \delta_{2z}$  — эквивалентный зазор трансформатора без подмагничивания при заданном значении  $E_{tp} = \left(1 + \frac{r'_2}{R'_H}\right) U'_2$ .

3. Для заданного  $U'_2$  находим потребляемый ток:

$$I_1 = \left(1 + \frac{r'_2}{R'_H}\right) \frac{U'_2}{x_{tp}} \sqrt{1 + \frac{x_{tp}^2}{(R'_H + r'_2)^2} + 2\gamma}.$$

4. Определяем  $a_1$  из формулы (11), где

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_c}{1 + \frac{r'_2}{R'_H}} \sqrt{1 - \frac{r'_2}{R'_H} \left(1 + \frac{r'_2}{R'_H}\right) \frac{1}{\alpha_c^2}}.$$

5. Определяем

$$x_{dp} = \frac{a_1 U'_2}{I_1} - x_s.$$

6. Находим  $\delta'_1$  по формуле

Таблица 1

Вид изделия	Параметры											
	D, мм	l, мм	w <sub>Ф</sub>	k <sub>об</sub>	δ <sub>0</sub> , мм	p	k <sub>тр</sub>	w <sub>0</sub>	r <sub>1</sub> , Ом	x <sub>1s</sub> , Ом	x <sub>2s</sub> ', Ом	r <sub>2</sub> ', Ом
Дроссель	80	90	20	0,925	0,11	2	—	115	0,029	0,204	—	—
Трансформатор	111	90	20	0,925	0,20	2	2	115	0,029	0,056	0,056	0,010

Таблица 2

Эксперимент					Расчет								
i <sub>1</sub> , А	i <sub>2</sub> , А	U <sub>др</sub> , В	U <sub>тр</sub> , В	I <sub>1</sub> , А	B <sub>δ1</sub> , Тл	B <sub>δ2</sub> , Тл	x <sub>тр</sub> , Ом	x <sub>др</sub> , Ом	δ <sub>1</sub> ', мм	δ <sub>2</sub> ', мм	I <sub>1</sub> , А	i <sub>1</sub> , А	i <sub>2</sub> , А
9	0	76	67	35	0,636	0,405	12,88	2,19	0,848	0,200	34,4	8,85	0
0	0	100	44	22	0,806	0,242	12,88	4,62	0,400	0,200	20,6	0	0
0	9	100	18	23	0,806	0,102	0,89	4,62	0,400	2,885	20,8	0	8,42

$$\delta_1' = \frac{6f\mu_0 D_1 l_1 w_1^2 k_{061}^2}{p^2 x_{dp}}$$

и зазор, соответствующий намагниченному ярму,  $\delta_{1j} = \delta_1' - \delta_{10}$ , где  $\delta_{10}' = \delta_{10} + \delta_{1z}$ .

7. Находим максимальную индукцию воздушного зазора дросселя:

$$B_{\delta1} = \frac{p I_1 x_{dp}}{4,44 D_1 l_1 w_1 k_{061}}.$$

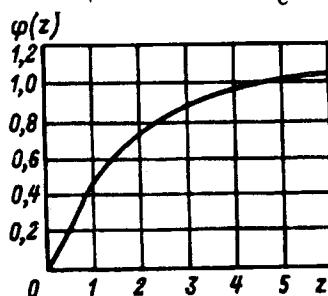
8. Определяем ток подмагничивания ярма дросселя [5]:

$$i_1 = \frac{p \delta_{1j} B_{\delta1}}{4 \cdot 10^{-7} w_{01} [\varphi(\beta_1 B_{\delta1}) + \varphi(\beta_1' B_{\delta1})]},$$

где  $\varphi(z)$  — универсальная функция (рис. 6);  $\beta_1 = \beta \frac{D_1}{2h_{j1} p k_3}$ ;  $\beta_1' = \beta' \frac{D_1}{2h_{j1} p k_3}$ ;  $\beta, \beta'$  — коэффициенты в зависимости  $H = \alpha \operatorname{sh} \beta B$  для внешнего и внутреннего ярм [5].

Выполнив вычисления для ряда значений  $U_2$ , строим кривую  $bc$  (рис. 5).

Сравнение расчета с экспериментом. Для проверки полученных соотношений был испытан регулируемый источник питания с трехфазным дросселем и трансформатором, работающий от сети  $U_c = U_\Phi = 115$  В при

Рис. 6. Универсальная функция  $\varphi(z)$ 

частоте  $f=400$  Гц. Расчетные параметры дросселя и трансформатора, магнитопроводы которых выполнены из стали 2421, приведены в табл. 1.

Расчетные и экспериментальные данные для трех значений токов подмагничивания ( $i_1=9$  А,  $i_2=0$ ), ( $i_1=0$ ,  $i_2=9$  А) приведены в табл. 2 ( $U_c=117$  В,  $R_H'=2,1$  Ом).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 32416 (СССР). Трансформатор для непосредственного питания синхронного двигателя/ Т.Поль, И.Карасенко-Косаревич. — Опубл. 26.02.30.
2. А.с. 524234 (СССР). Статический регулируемый трансформатор с вращающимся магнитным полем. В.Ф.Шукалов, Н.А.Иванова. — Опубл. 05.08.76. Бюлл. № 29.
3. Либкинд М.С., Черновец А.К. Управляемый реактор с вращающимся магнитным полем — М.: Энергия. 1971.
4. Иванов В.А., Иванова Н.А., Шукалов В.Ф. Многофазные выпрямители на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем. — Межвуз. сб. Ленингр. ин-т авиац. приборостроения, 1980, вып. 144.
5. Мартынов А.А., Хрущев В.В. Индуктивное сопротивление многофазного трансформатора с вращающимся магнитным полем и подмагничиваемым ярмом — М.: Электричество, 1994 № 4.

(17.02.93)

Авторы: Мартынов Александр Александрович окончил электромеханический факультет в Ленинградском институте авиационного приборостроения (ЛИАП) в 1964 г. В 1971 г. защитил в ЛИАП кандидатскую диссертацию по тематике «Электромашинно-вентильные системы». Доцент Санкт-Петербургской государственной академии аэрокосмического приборостроения.

Хрущев Виталий Васильевич окончил физический факультет Ленинградского государственного университета в 1946 г. В 1962 г. защитил в ЛИАП докторскую диссертацию по тематике «Электрические микромашины». Профессор Санкт-Петербургской государственной академии аэрокосмического приборостроения.

# Диагностирование кратных дефектов элементов автоматизированного электропривода

САГУНОВ В.И.

Рассматривается задача выбора минимального числа точек контроля. Устанавливаются условия существования эквивалентных кратных дефектов. Построение алгоритма основано на нарушении условий эквивалентности кратных дефектов. Приводится пример, иллюстрирующий предложенный подход.

Для повышения эффективности работы автоматизированных электроприводов и снижения затрат на их эксплуатацию широко используются методы и средства технического диагностирования [1]. Техническому диагностированию электромеханических систем посвящены также работы [2–5]. Характерной особенностью этих работ является то обстоятельство, что все предлагаемые алгоритмы диагностирования в них ориентированы на одиночные дефекты. Однако довольно часто, особенно в процессе отладки автоматизированных электроприводов, возникает потребность в диагностировании кратных дефектов.

Цель статьи — попытка разработать формализованной подход к диагностированию кратных дефектов элементов автоматизированных электроприводов. При этом предполагаем, что объект диагностирования представлен логической моделью в форме ориентированного графа [1], а вершины его упорядочены так, что каждая дуга выходит из вершины с меньшим номером и входит в вершину с большим номером.

**Постановка задачи.** Пусть задан ациклический ориентированный граф  $G$  с  $n$  вершинами, представляющий собой логическую модель непрерывного комбинированного элемента автоматизированного электропривода. Каждая вершина такого графа обозначает функциональный блок рассматриваемого элемента, если блок имеет один выход, или логический блок, если функциональный блок имеет несколько выходов [1]. Дуги соответствуют связям между блоками.

Требуется назначить минимальное множество точек контроля, которое обеспечивает поиск кратных дефектов, и построить алгоритм диагностирования.

**Выбор минимального множества точек контроля.** Пусть в объекте диагностирования в некоторый момент времени одновременно отказалось некоторое множество блоков, тогда совокупность номеров  $(i_1, \dots, i_k)$  вершин графа  $G$ , соответствующих отказавшим блокам, назовем дефектом кратности  $k$ .

Рассмотрим две вершины  $p$  и  $g$  ( $p=1, n; g=1, n$ ) графа  $G$ , причем  $g$  достижима из  $p$ . Прот-

*A problem of selection of minimum number of check-points is dealt with. Conditions of existence of equivalent multiple defects are ascertained. Construction of algorithm is based on the violation of conditions of the multiple defects equivalence. An example, illustrating the proposed approach, is presented.*

веркой контрольной пары  $(p, g)$  будем называть  $n$ -мерный вектор  $b(p, g) = (b_1, \dots, b_n)$ , компонента  $b_l$  которого равна 1, если существует хотя бы один путь от вершины  $p$  к вершине  $g$ , содержащий вершину  $l$ , и равна 0 в противном случае. Будем считать, что  $b(p, g) = 1$ , если подавая допустимый сигнал на вершину  $p$ , можно снять в точке  $g$  значение этого сигнала, находящееся в области допустимых значений, и  $b(p, g) = 0$  в противном случае. Проверку с допустимым входным сигналом будем называть допустимой. Если имеется  $M$  проверок, то матрицей проверок назовем матрицу  $B = \{ |b_{ij}| \mid (i=1, m; j=1, n)\}$ , в которой

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } j \text{ входит в проверку} \\ & i-\text{й контрольной пары;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пусть имеет место два кратных дефекта  $(i_1, \dots, i_m)$  и  $(j_1, \dots, j_l)$ . Назовем вектор  $X$  линейной комбинацией векторов  $X_1, \dots, X_m$ , где  $X_i = (x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)})$ , причем  $x_j^{(i)} \in \{0, 1\}$ , если вектор  $X$  можно представить дизъюнкцией вида

$$X = X_1 \cup \dots \cup X_m. \quad (1)$$

Тогда, если из столбцов матрицы  $B$  можно построить линейные комбинации вида

$$B^{(i_1)} \cup \dots \cup B^{(i_m)} = B^{(j_1)} \cup \dots \cup B^{(j_l)}, \quad (2)$$

где  $i_r \neq j_s$  ( $r=\overline{1, m}; s=\overline{1, l}$ ) и  $1 \leq i_m, j_l \leq n$ , то два кратных дефекта будут эквивалентны в силу того, что результаты исполнения всех проверок при обоих дефектах будут одинаковы.

Таким образом, если из столбцов матрицы  $B$  можно построить хотя бы одну линейную комбинацию вида (2), то имеющихся проверок недостаточно для поиска кратных дефектов.

Будем говорить, что контрольная точка  $s$  нарушает линейную комбинацию (2), если существует проверка  $b(p, s)$ , где  $p$  — некоторый вход, добавление которой к матрице  $B$  приводит ее к виду, не позволяющему построить соотношение (2) из столбцов с номерами  $i_1, \dots, i_m, j_1, \dots, j_l$ .

Для выполнения этого условия необходимо,

чтобы дополнительная точка контроля удовлетворяла одному из следующих требований: все пути от некоторого входа  $p$  до точки  $s$ , содержащие хотя бы одну из точек множества  $\{i_1, \dots, i_m\}$ , не содержат ни одной из точек множества  $\{j_1, \dots, j_l\}$ ; все пути от некоторого входа  $p$  до точки  $s$ , содержащие хотя бы одну из точек множества  $\{j_1, \dots, j_l\}$ , не содержат ни одной из точек множества  $\{i_1, \dots, i_m\}$ .

Процедуру назначения дополнительных точек контроля можно существенно упростить, если предварительно назначить обязательные точки контроля. К обязательным точкам контроля относятся все выходы вершин графа  $G$ , не имеющие разветвления, т.е. если вершина  $t$  связана с вершиной  $f$  только одной единственной связью, то выход вершины  $t$  является обязательной точкой контроля [6].

Аналогичная ситуация возникает и тогда, когда предварительно назначены точки контроля для поиска одиночных дефектов согласно [1]. Такие точки контроля назовем исходным множеством точек контроля.

Выбрав в соответствии с указанными выше требованиями все точки контроля, которые нарушают некоторую линейную комбинацию, образуем вектор-строку  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ , в которой  $\varepsilon_i = 1$ , если  $i$ -я точка контроля нарушает данную линейную комбинацию, и  $\varepsilon_i = 0$  в противном случае. Построив такие вектор-строки для всех линейных комбинаций исходной матрицы  $B$ , объединим их в матрицу  $\tilde{B}$ . Минимальное покрытие этой матрицы системой столбцов определит минимальное множество точек контроля, которое, будучи добавленным к исходному, позволит осуществлять поиск дефектов любой кратности. Если минимальных покрытий несколько, то может быть взято любое. В отдельных случаях мощность минимального множества точек контроля и исходного равна числу вершин графа  $G$ . Такая ситуация обычно возникает при малом числе вершин с разветвлением выходных дуг.

**Поиск кратных дефектов.** Для поиска кратных дефектов необходимо расширить матрицу  $B$ , добавив в нее проверки, соответствующие дополнительным точкам контроля. Расширенную матрицу проверок обозначим  $\tilde{B}$ . Строку матрицы  $\tilde{B}$ , содержащую один ненулевой элемент, назовем определяющей. Тогда пошаговый алгоритм поиска кратных дефектов заключается в следующем:

1. В матрице  $\tilde{B}$  отыскиваем определяющую строку и производим допустимую проверку, соответствующую этой строке. Если результат проверки равен 1, переходим к п. 2. Если результат проверки равен 0, то номер столбца, содержащего ненулевой элемент определяющей строки, опре-

деляет номер дефектного блока. Найденный дефект устраняется и выполняется п. 2.

2. Из матрицы  $\tilde{B}$  вычеркиваются строка, соответствующая произведенной проверке, и столбец, содержащий в ней ненулевой элемент. Если число столбцов оставшейся части матрицы  $\tilde{B}$  не равно нулю, следует переход к п. 1, оставляя допустимыми ранее произведенные проверки, в противном случае поиск окончен.

**Пример.** В качестве объекта диагностирования рассмотрим систему импульсно-фазового управления тиристорного электропривода серии КТЭ 100/220. Функциональная модель СИФУ этого электропривода, построенная по принципиальной схеме, в соответствии с правилами, изложенными в [1], приведена на рис. 1.

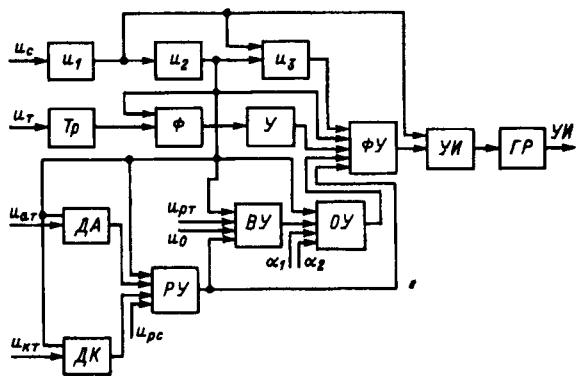


Рис. 1. Функциональная модель СИФУ тиристорного электропривода серии КТЭ 100/220:  $U_1, U_2, U_3$  – источники питания СИФУ;  $Tr$  – блок трансформаторов;  $\Phi$  – ячейка фильтров;  $U$  – операционные усилители;  $VU$  – входной усилитель;  $OY$  – операционный усилитель;  $FU$  – ячейка каналов фазового управления;  $UI$  – усилители импульсов;  $GR$  – система гальванической развязки;  $DA, DK$  – блоки датчиков;  $RU$  – ячейка разделенного управления

Входными сигналами СИФУ как объекта диагностирования являются:  $u_c$  – трехфазное напряжение питания источника постоянного напряжения  $u_1$ ;  $u_t$  – трехфазное напряжение питания блока трансформаторов  $Tr$ ;  $u_{p,t}$  – напряжение управления тиристорного преобразователя, поступающее с выхода регулятора тока схемы управления электроприводом;  $u_0$  – начальное напряжение управления СИФУ тиристорного преобразователя, определяющее выходное напряжение электропривода при отсутствии  $u_{p,t}$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  – напряжения, определяющие предельное изменение соответственно минимального и максимального углов управления тиристорного преобразователя;  $u_{a,t}, u_{k,t}$  – напряжения между анодом и катодом тиристоров соответственно анодной и катодной группами тиристорного преобразователя, определяющие состояния проводимости тиристоров;  $u_{p,c}$  – выходное напряжение регулятора скорости

схемы управления электропривода, определяющее желаемое направление выходного тока тиристорного преобразователя.

Выходными сигналами СИФУ являются управляющие импульсы тиристорами тиристорного преобразователя.

Так как при поиске дефектов в СИФУ нет необходимости строго следить за выполнением функциональных зависимостей между входными и выходными сигналами, то достаточно сделать лишь заключение о техническом состоянии СИФУ по результатам оценки значений его входных и выходных сигналов вида «в допуске — не в допуске». Логическое высказывание «входной (или выходной) сигнал не выходит за множество допустимых его значений» обозначается 1, а высказывание «входной (или выходной) сигнал выходит за множество допустимых его значений» символом 0. В таких случаях удобно перейти от функциональной к логической модели объекта диагностирования для упрощения процедуры обработки результатов диагностирования.

В рассматриваемом примере для получения логической модели СИФУ достаточно заменить каждый функциональный блок логическим блоком, так как каждый из функциональных блоков имеет только один выход [1].

Полученная логическая модель СИФУ тиристорного электропривода в форме ориентированного графа приведена на рис. 2. На рис. 2 входные

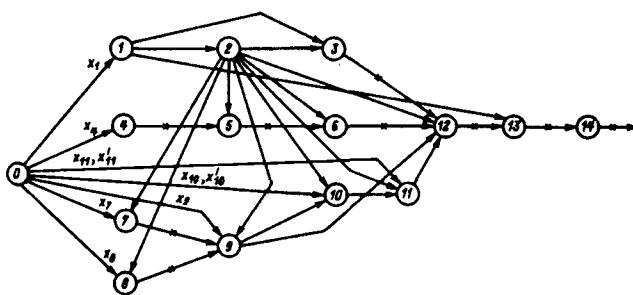


Рис. 2. Логическая модель СИФУ тиристорного электропривода серии КТЭ 100/220

внешние сигналы  $x_1, x_4, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{10}', x_{11}, x_{11}'$  соответствуют сигналам  $u_c, u_t, u_{a.t}, u_{k.t}, u_{p.c}, u_{p.t}, u_0, \alpha_1, \alpha_2$ . Вершина «0» является фиктивной вершиной и введена только для удобства обозначения проверок. Дуги, помеченные знаком \*, соответствуют обязательным точкам контроля. Тогда матрица проверок принимает вид

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$b(0,3)$	1	1	1	1											
$b(0,4)$		1													
$b(0,5)$	1	1	1		1	1									
$b(0,6)$	1	1	1		1	1	1								
$b(0,7)$		1												1	
$b(0,8)$		1												1	
$b(0,10)$	1	1	1												1
$b(0,11)$	1	1	1											1	1
$b(0,12)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$b(0,13)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$b(0,14)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

В матрице  $B$  и далее незаполненные клетки соответствуют нулевым элементам. По этой матрице построим все линейные комбинации:

$$L_1 : B^{(1)} = B^{(2)} ;$$

$$L_2 : B^{(9)} = B^{(12)} ;$$

$$L_3 : B^{(1)} = B^{(3)} \cup B^{(5)} \cup B^{(10)} ;$$

$$L_4 : B^{(2)} = B^{(3)} \cup B^{(5)} \cup B^{(10)} .$$

Матрица  $\tilde{e}$  имеет вид

	1	2	9	.
$L_1$	1			
$L_2$			1	
$L_3$	1	1		
$L_4$		1		

Минимальное покрытие  $\gamma = \{1, 2, 9\}$ . Следовательно, для поиска кратных дефектов необходимо дополнительно назначить точки контроля 1, 2, 9. Тогда расширенная матрица проверок  $\tilde{B}$  имеет вид

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$b(0,3)$	1	1	1											
$b(0,4)$									1					
$b(0,5)$	1	1		1	1									
$b(0,6)$	1	1		1	1	1								
$b(0,7)$													1	
$b(0,8)$													1	
$b(0,10)$														1
$b(0,11)$													1	1
$b(0,12)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$b(0,13)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$b(0,14)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$b(0,1)$		1												
$b(0,2)$	1	1												
$b(0,9)$	1	1							1	1	1			

В соответствии с алгоритмом диагностирования кратных дефектов может быть произведена, например, такая группа допустимых проверок в последовательности:  $b(0,1)$ ,  $b(0,2)$ ,  $b(0,3)$ ,  $b(0,4)$ ,  $b(0,5)$ ,  $b(0,6)$ ,  $b(0,7)$ ,  $b(0,8)$ ,  $b(0,9)$ ,  $b(0,10)$ ,  $b(0,11)$ ,  $b(0,12)$ ,  $b(0,13)$ ,  $b(0,14)$ , т.е. первоначально допустимой проверкой является проверка  $b(0,1)$ , затем  $b(0,1)$  и  $b(0,2)$  и т.д.

В заключение необходимо отметить, что предложенная процедура диагностирования несколько усложняется по сравнению с описанной в [1], однако рассматриваемый подход позволяет локализовать дефекты произвольной кратности, что очень важно с практической точки зрения при отладке автоматизированных электроприводов.

Предложенный подход можно распространить и на другие элементы электроприводов, если они могут быть представлены как объекты диагностирования логической моделью. В частности, это могут быть одноразрядные комбинационные сумматоры, силовая часть однофазного однополупериодного тиристорного преобразователя (ТП), силовая часть однофазного двухполупериодного ТП со средней точкой, силовая часть однофазного мостового ТП, силовая часть трехфазного ТП со средней точкой.

Сказанное выше в равной степени относится к тиристорным электроприводам на элементах УБСР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов О.И., Усынин Ю.С. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Мозгалевский А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика. (Непрерывные объекты). — М.: Высшая школа, 1975.
3. Глазунов Л.П., Смирнов А.Н. Проектирование технических систем диагностирования. — Л.: Энергоатомиздат, 1982.
4. Дмитриев А.К. Распознавание отказов в системах электроавтоматики. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Мозгалевский А.В., Гаскаров Д.В., Глазунов Л.П., Ерастов В.Д. Автоматический поиск неисправностей. — Л.: Машиностроение, 1967.
6. Основы технической диагностики. Под ред. П.П. Пархоменко — М.: Энергия, 1976.

[29.09.93]

*Автор: Сагунов Виктор Ильич в 1963 г. окончил Казанский авиационный институт. В 1982 г. в Ленинградском электротехническом институте защитил докторскую диссертацию на тему «Структурные методы обеспечения контроллергодности объектов диагностирования непрерывного и дискретного действия». Работает в Нижегородском государственном техническом университете заведующим кафедрой «Информатика и системы управления».*

## Определение отклонения от согласованного режима четырехполюсника

ПЕНИН А.А.

Поставлена и решена задача по определению и сравнению относительных режимов по переменным типа КПД и мощность (нагрузки) как кривых второго порядка с различными экстремальными значениями на основе проективного соответствия точек характерных режимов. Предложен методический прием для определения классов этих точек, получены выражения для задания режима по КПД. Результаты позволяют провести анализ загрузки отдельных узлов, работающих в составе сложной системы.

**Введение.** Различные системы электропитания, устройства преобразовательной техники представляют собой совокупность источников энергии и силовых узлов, каждый из которых характеризуется своими значениями (как масштабами) максимальных мощностей, КПД и других возможных характеристик. Изменение нагрузки, особенно в широких пределах — от режима потребления до отдачи энергии (накопители энергии) — приводит к отклонению подобных энергетических характеристик от режима согласова-

*The problem of determination and comparison between relative regimes as (power) efficiency and load power variables is formulated on terms of quadratic curves with various extremal values and solved on the basis of projective conformity between the points of characteristic regimes. The method for determining the points classes is suggested, and the expressions to define the regime with respect to (power) efficiency are obtained. The results obtained allow to analyse the load in each block of a complex network.*

ния, экстремальных или каких-либо других заданных характерных значений.

В связи с этим необходимо корректно определять эти отклонения в относительном виде во всем диапазоне изменений нагрузки для рассматриваемых элементов одной или разных систем. Это позволит, например, обоснованно оценить загрузку узлов, эквивалентность их режимов.

В [1] рассматривается определение режимов сравниваемых четырехполюсников по таким параметрам, как ток, напряжение, соответствующим

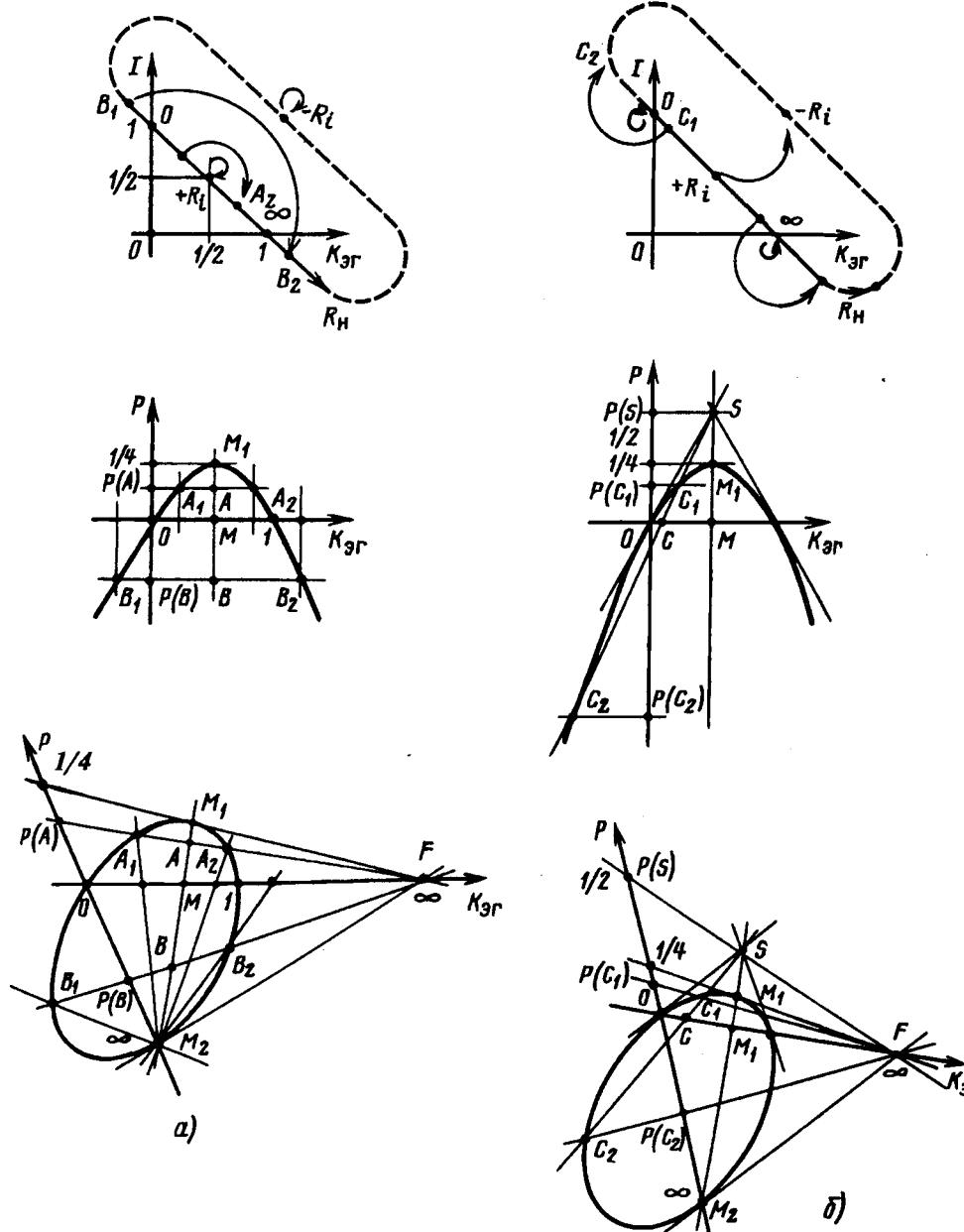


Рис. 1. Зависимости тока и мощности нагрузки от коэффициента передачи по напряжению в декартовой и проективной системах координат: а — симметрия относительно максимальной мощности; б — симметрия режима потребления и отдачи энергии

им коэффициентам передач на основе аффинных и проективных соответствий. Эти все параметры режима представляют собой линейные и дробно-линейные выражения. В рассматриваемой постановке задачи такие характеристики, как мощности и КПД, представляют квадратичные выражения и определяют кривые или поверхности второго порядка. Эти кривые также обладают аналогичными проективными свойствами, что позволяет на этой основе сопоставить кривые одного типа разных цепей. Тогда можно получить в относительном виде через инварианты проективных преобразований выражения для отклонения режима от заданного значения.

**Проявление симметрии режима по мощности.** Рассмотрим активную цепь постоянного тока — эквивалентный генератор. Мощность нагрузки, нормированная на максимальную мощность эквивалентного генератора,

$$P = P_H / P_{\text{э.г max}} = K_{\text{э.г}} - K_{\text{э.г}}^2, \quad (1)$$

где  $K_{\text{э.г}} = U_H / U_H(\text{xx})$  — коэффициент передачи по напряжению для цепи эквивалентного генератора.

В данное выражение входят только относительные параметры, поэтому кривые (1) для разных цепей совпадают друг с другом. Тогда не вызывает проблемы задание равных режимов — это просто соответствующее равенство величин  $K_{\text{э.г}}$  и  $P$ . Но полезным будет более глубокий анализ, что позволит обобщить обоснование равенства режимов и их отклонение от заданного и будет служить методической основой для рассмотрения далее следующего режима — режима по КПД, который не является таким тривиальным.

На рис. 1, а представлены нормированная нагрузочная прямая

$$I = I_H / I_{\text{max}} = 1 - K_{\text{э.г}}$$

и парабола (1) в декартовой и проективной си-

стемах координат. Проективная интерпретация позволяет глобально оценить поведение режима и использовать ряд геометрических понятий.

Как уже отмечалось [1], режимы сравниваемых цепей будут одинаковы, если характерные точки рассматриваемых кривых соответствуют друг другу. Эти точки являются базовыми или координатными, относительно которых выражаются точки текущего режима. Из рассмотрения рис. 1, а следует, что имеются четыре характерных точки — это точки экстремальных значений мощности  $M_1$ ,  $M_2$  и нулевой мощности — 0, 1. Им соответствуют на нагрузочной прямой точки  $+R_i$ ,  $-R_i$ , 0,  $\infty$ .

Так как проективная координата текущей точки задается через сложное отношение относительно трех базовых [2, 3], то необходимо разобраться, какие комбинации трех из этих четырех характерных могут использоваться. Для этого рассмотрим проявление симметрий данной кривой.

Обращает на себя внимание симметрия параболы относительно прямой  $M_1M_2$ . Симметрия связана с тем, что значениям  $P(A) > 0$ ,  $P(B) < 0$  соответствуют по два значения  $K_{\text{э.г}}$  или  $R_h$ , которые, решая (1), связаны между собой следующими условиями:

$$\left. \begin{aligned} K_{\text{э.г}}(A_1) + K_{\text{э.г}}(A_2) &= 1; \\ R_h(A_1)R_h(A_2) &= R_i^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Соответствия или отображения этих точек друг на друга показаны стрелками на нагрузочной прямой. Точки  $R_h = \pm R_i$  в этом случае являются неподвижными.

Соотношения (2) являются следствием из более общих выражений, определяющих свойства таких понятий, как полюс и поляр. Прямая  $M_1M_2$  называется полярой, которая относительно уже замкнутой кривой на проективной плоскости задает полюс  $F$ . Полюс определяется пересечением касательных в точках  $M_1M_2$ . Значению  $P(A)$  соответствует прямая, проходящая через полюс и пересекающая кривую в точках  $A_1$ ,  $A_2$  и поляру в точке  $A$ . В геометрии известно свойство гармонической сопряженности точек  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A$  и полюса  $F$  — их сложное отношение

$$(A_1AFA_2) = -1. \quad (3)$$

Если спроектировать эти точки на прямую  $K_{\text{э.г}}$  из точки  $M_2$ , то получим с учетом (2) соответствующее сложное отношение для  $K_{\text{э.г}}$ :

$$\begin{aligned} (K_{\text{э.г}}(A_1) 1/2 \infty K_{\text{э.г}}(A_2)) &= \frac{1/2 - K_{\text{э.г}}(A_1)}{1/2 - K_{\text{э.г}}(A_2)}: \\ \frac{\infty - K_{\text{э.г}}(A_1)}{\infty - K_{\text{э.г}}(A_2)} &= \frac{1/2 - K_{\text{э.г}}(A_1)}{1/2 - K_{\text{э.г}}(A_2)} = -1. \end{aligned}$$

Поэтому уже рассмотренные характерные точки также являются гармонически сопряженными:

$$\begin{aligned} (0M_1M_21) &= (0K_{\text{э.г}}=1/2K_{\text{э.г}}=\infty 1) = \\ &= \frac{1/2 - 0}{1/2 - 1} : \frac{\infty - 0}{\infty - 1} = -1. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, из этой четверки точек можно использовать произвольные комбинации из трех в качестве базовых. Пусть, например, это будут точки 0,  $1/2$ , 1 по оси  $K_{\text{э.г}}$ , что соответствует точкам 0,  $+R_i$ ,  $\infty$  на нагрузочной прямой  $R_h$ . Тогда для текущей точки получаем сложное отношение как проективную координату или режим цепи [4]:

$$\begin{aligned} m(K_{\text{э.г}}) &= (0K_{\text{э.г}}1/21) = \frac{K_{\text{э.г}} - 0}{1 - K_{\text{э.г}}} = \\ &= (0R_h + R_i\infty) = R_h/R_i, \end{aligned} \quad (5)$$

что соответствует сложившейся практике.

Из (5) следует, что если  $K_{\text{э.г}} = 1/2$ , т.е. если нет отклонения от режима согласования, то  $m(1/2) = 1$ .

Далее рассмотрим другой вид симметрии на рис. 1, б, который демонстрирует отображение области потребления энергии ( $P > 0$ ) на область отдачи энергии ( $P < 0$ ) нагрузкой. Дело в том, что когда  $P > 0$ , то режим, согласно (5), задается величиной  $+R_h$ . Естественно, когда нагрузка уже отдает энергию, то режим выражается аналогично, но значением  $-R_h$ . Поэтому возникает вопрос о связи  $K_{\text{э.г}}$  и  $P$  для этих двух режимов. Такая связь также демонстрируется свойствами полюса и поляры. На рис. 1, б поляра  $OF$  определяет ось симметрии, а соответствующий ей полюс отображает точки  $P(C_1) > 0$  на точки  $P(C_2) < 0$ . Также и точки экстремальных мощностей  $M_1$ ,  $M_2$  отображаются друг на друга. Аналогично (3) точки  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C$  и  $S$  являются гармонически сопряженными, как и точки  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M$ ,  $S$ . Этим наборам гармонических точек соответствуют пучки гармонических прямых с центром или полюсом  $F$ : это прямые  $SF$ ,  $C_1F$ ,  $CF$ ,  $C_2F$  и  $SF$ ,  $M_1F$ ,  $MF$ ,  $M_2F$ .

Если пересечь прямые пучков осью  $P$ , то получим значения мощностей для этих точек, которые также являются гармонически сопряженными. В частности:

$$\begin{aligned} (P(M_1)P(S)P(M)P(M_2)) &= (1/4 1/2 0 \infty) = \\ &= \frac{1/2 - 1/4}{1/2 - \infty} : \frac{0 - 1/4}{0 - \infty} = \frac{1/2 - 1/4}{0 - 1/4} = -1. \end{aligned}$$

Таким образом, для оси мощностей точки  $1/4$ ,  $1/2$ ,  $0$ ,  $\infty$  являются характерными. Из свойства гармонической сопряженности устанавливается непосредственная связь между  $P(C_2)$  и  $P(C_1)$ . Аналогично, если отобразить точки  $S$ ,  $C_1$ ,  $C$ ,  $C_2$  из точки  $M_2$  на ось  $K_{\text{э.г}}$ , то получаем также гармоническую четверку точек:  $K_{\text{э.г}}(S) = 1/2$ ,  $K_{\text{э.г}}(C_1)$ ,  $K_{\text{э.г}}(C)$ ,  $K_{\text{э.г}}(C_2)$ . Приведенные рассуждения дают методическую основу для определения относительных режимов по различным параметрам, которые выражаются кривыми второго порядка.

**Проблема определения режима по КПД.** Рассмотрим четырехполюсник постоянного тока с П-образной схемой замещения и  $Y$ -параметрами. Приведем основные необходимые соотношения [5]. Уравнение несимметричного четырехполюсника, записанное через параметры передачи:

$$\begin{pmatrix} \frac{U_0}{\sqrt{\frac{Y_{11}}{Y_{00}}}} & I_0 \\ \sqrt{\frac{Y_{11}}{Y_{00}}} & \frac{I_0}{\sqrt{\Delta_Y}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{ch}\gamma & \operatorname{sh}\gamma \\ \operatorname{sh}\gamma & \operatorname{ch}\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{Y_{11}}{Y_{00}}} U_1 \\ I_1 \\ \frac{I_1}{\sqrt{\Delta_Y}} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $\Delta_Y$  — определитель матрицы  $Y$ -параметров;  $\text{ch}\gamma = \sqrt{Y_{00} Y_{11}} / Y_{10}$ ;  $\gamma$  — коэффициент затухания. Ток нагрузки  $I_1 = Y_h U_1$ , ток на входе  $I_0 = -Y_{bx} U_0$ , где входная проводимость

$$Y_{bx} = \frac{Y_h Y_{00} + \Delta_Y}{Y_h + Y_{11}}. \quad (7)$$

Коэффициент передачи по напряжению

$$K_U = \frac{U_1}{U_0} = \frac{Y_{10}}{Y_{11} + Y_h} = \quad (8)$$

$$= \sqrt{\frac{Y_{00}}{Y_{11}}} \left( \text{ch}\gamma - \frac{Y_{bx}}{Y_{bx.c}} \text{sh}\gamma \right) = \quad (9)$$

$$= \sqrt{\frac{Y_{00}}{Y_{11}}} \frac{1}{\text{ch}\gamma + \text{sh}\gamma Y_h / Y_{h.c}}, \quad (9a)$$

где  $Y_{bx.c} = \sqrt{\Delta_Y Y_{00} / Y_{11}}$ ,  $Y_{h.c} = \sqrt{\Delta_Y Y_{11} / Y_{00}}$  — характеристические проводимости со стороны входа и выхода четырехполюсника. Для симметричного четырехполюсника  $Y_{bx.c} = Y_{h.c} = \sqrt{\Delta_Y}$ .

Коэффициент передачи по мощности (КПД)

$$K_P = \frac{P_1}{P_0} = K_U \frac{Y_{10} - Y_{11} K_U}{Y_{00} - Y_{10} K_U} = \quad (10)$$

$$= \text{ch}^2\gamma + \text{sh}^2\gamma - \text{ch}\gamma \text{sh}\gamma \left( \frac{Y_{bx}}{Y_{bx.c}} + \frac{Y_{bx.c}}{Y_{bx}} \right) = \quad (11)$$

$$= \frac{1}{\text{ch}^2\gamma + \text{sh}^2\gamma + \text{ch}\gamma \text{sh}\gamma (Y_h / Y_{h.c} + Y_{h.c} / Y_h)}. \quad (11a)$$

Можно отметить, что отношение  $Y_{bx} / Y_{bx.c}$  или  $Y_h / Y_{h.c}$  задает определенным образом отклонение от режима согласования для заданного четырехполюсника. Но если сравнивать так четырехполюсники с различным затуханием (или максимальным КПД), то очевидно, что эти отношения должны быть также разные, чтобы обеспечить желаемую эквивалентность режимов. Это видно хотя бы из такого примера. Пусть необходимо обеспечить легко идентифицируемый режим  $Y_{bx}=0$  (т.е. сравниваемые четырехполюсники по входу не потребляют энергию). Тогда согласно (7)  $Y_h = -\Delta_Y / Y_{00}$ , что в свою очередь определяет различные отношения  $Y_h / Y_{h.c}$  для этих цепей. Задача сводится, таким образом, к получению обобщенных относительных выражений для параметров передачи и отклонений от режима согласований с учетом различия четырехполюсников.

Необходимо также отметить, что такой параметр, как  $K_U$ , в виде (9) неудобен, так как содержит отношение  $Y_{00} / Y_{11}$ . В этом смысле параметр  $K_P$  в виде (11) не связан с несимметричностью четырехполюсника. Поэтому используем результаты [6], где вместо  $K_U$  вводится коэффициент передачи по цепи эквивалентного генератора

$$K_{\vartheta.g} = \frac{U_1}{U_1(x)} = \frac{Y_{11}}{Y_{10}} \frac{U_1}{U_0} = \frac{Y_{11}}{Y_{10}} K_U.$$

Тогда (10) примет вид

$$K_P = K_P(K_{\vartheta.g}) = K_{\vartheta.g} \frac{1 - K_{\vartheta.g}}{A - K_{\vartheta.g}}, \quad (12)$$

где  $A = \frac{P_{0max}}{P_{\vartheta.g max}} = \frac{Y_{00} Y_{11}}{Y_{10}^2} = \text{ch}^2\gamma$ ;  $P_{0max} = Y_{00} U_0^2$  — максимальная мощность, отдаваемая источником  $U_0$  в режиме (К3) нагрузки;  $P_{\vartheta.g max} = U_1^2(x) / R_i = U_0^2 Y_{10}^2 Y_{11}$  — максимальная мощность, отдаваемая эквивалентным генератором также в режиме (К3) нагрузки.

В свою очередь выражение (9) преобразуем следующим образом. Умножим обе части на  $\sqrt{Y_{11} / Y_{00}} \text{ch}\gamma$ , тогда получим

$$\text{ch}\gamma \sqrt{\frac{Y_{11}}{Y_{00}}} K_U = \frac{Y_{11}}{Y_{10}} K_U = \text{ch}^2\gamma - \text{ch}\gamma \text{sh}\gamma \frac{Y_{bx}}{Y_{bx.c}}$$

или

$$K_{\vartheta.g} = A - \sqrt{A(A-1)} \frac{Y_{bx}}{Y_{bx.c}}. \quad (13)$$

Аналогично имеем

$$K_{\vartheta.g} = \frac{\text{ch}\gamma}{\text{ch}\gamma + \text{sh}\gamma Y_h / Y_{h.c}} = \frac{1}{1 + \sqrt{(A-1)/A} Y_h / Y_{h.c}}. \quad (13a)$$

Теперь можем изучить обобщенные выражения (12) и (13). На рис. 2,а приведена гипербола (12) для всей области изменения нагрузки — для режимов потребления и отдачи энергии. В режиме потребления

$$K_{Pmax} = (\sqrt{A} - \sqrt{A-1})^2; \quad K_{\vartheta.g}^- = A - \sqrt{A(A-1)}, \quad (14)$$

а в режиме отдачи

$$K_{Pmin} = (\sqrt{A} + \sqrt{A-1})^2; \quad K_{\vartheta.g}^+ = A + \sqrt{A(A-1)}, \quad (15)$$

что для  $K_P$  непосредственно следует из (11).

Как следует из (12), различные четырехполюсники задаются коэффициентом  $A$ , что наглядно показано на рис. 2,б. Анализ семейства кривых показывает, что точки экстремальных значений  $K_P$  лежат на одной прямой, которая пересекает ось  $K_{\vartheta.g}$  в точке 1/2, а ее тангенс угла наклона  $\tan\beta = 2$ . Чтобы подойти к сформулированной выше задаче (получить выражение для задания текущего режима  $K_{\vartheta.g}$ ,  $K_P$  относительно экстремального значения), необходимо определить соответствие характерных и текущих точек кривых разных четырехполюсников.

Для таких гипербол в проективной системе координат на рис. 2,в характерными точками могут быть:  $B_1, 0, M_1, 1, A_1, M_2$ . Эти точки можно различным образом отобразить на оси координат  $K_{\vartheta.g}, K_P$ . Поэтому на оси  $K_{\vartheta.g}$  получаются следующие характерные:  $B, 0, K_{\vartheta.g}^-, 1, A, K_{\vartheta.g}^+, G=\infty$ . Из

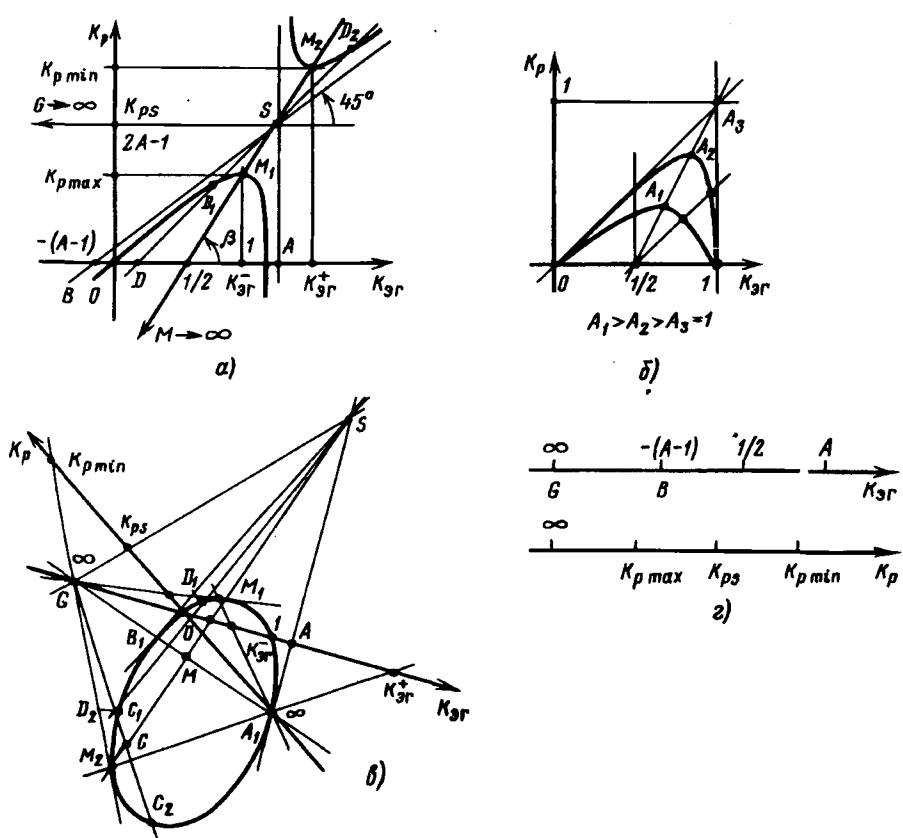


Рис. 2. Зависимость  $K_P(K_{3g})$ : а — в декартовой системе координат; б — семейство кривых для различных цепей; в — в проективной системе координат (симметрия режима потребления и отдача энергии по входу цепи); г) характерные точки режимов по  $K_{3g}$  и  $K_P$

них, как базовые, можно выбрать, например, точки 0,  $K_{3g}$ , 1. Но в рамках такой проективной схемы необходимо, чтобы остальные характерные выражались проективными координатами и не зависели от параметров сравниваемых цепей, т.е. от коэффициента  $A$ . Но нижеприведенные вычисления показывают, что эти координаты зависят. В связи с этим возникает промежуточная задача — разобраться в возможных системах характерных точек.

**Проявление симметрии режима по КПД.** Поляра  $B_1 A_1$  с полюсом  $S$  на рис. 2,в определяют отображение области  $K_P$  выше поляры, когда источник напряжения  $U_0$  отдает энергию в область ниже поляры, — этот источник потребляет уже энергию нагрузки. Тогда имеет место гармоническая четверка точек  $M_1, M, S, M_2$ . Этим точкам, как точкам поляры, соответствует пучок гармонических прямых с центром или полюсом  $G$ . Получили, таким образом, случай, подобный рис. 1,в. Любая прямая полюса  $G$  (ср. рис. 1,б) пересекает кривую в точках  $C_1, C_2$ . Поэтому имеет место гармоническая четверка точек  $C_1, C, G, C_2$ , что определяет симметрию относительно поляры  $M_1 M_2$ . В отличие от рис. 1,б эта ось симметрии обладает указанным выше наклоном — рис. 2,а,б.

Если прямые пучков  $S$  и  $G$  пересечь осями  $K_{3g}$  и  $K_P$ , то получим также гармонические точки, которые отдельно изображены на рис. 2,г. Эти гармонические четверки образовали одну из систем точек или систему координат по входу четырехполюсника.

Рассмотрим также треугольник  $SGM$ , который в проективной геометрии носит название автополярного — его вершины и стороны являются взаимно полюсами и полярами. Этот треугольник определяет специальную систему [в которой гипербола (12) принимает канонический вид], где  $S$  — начало координат, а  $SG, SM$  — оси. Эта система координат показана также на рис. 2,а.

Аналогично этому рассмотрим систему характерных точек по цепи нагрузки. Как видно из рис. 3,а,б, прямая или поляра  $OK_{3g}$  с полюсом  $F$  определяют отображение области  $K_P$  выше поляры, когда нагрузка

потребляет энергию, на область, когда нагрузка отдает энергию. Также имеет место гармоническая четверка точек  $M_1 M F M_2$ . Этим точкам, как и для рис. 2,в, соответствует пучок гармонических прямых с центром или полюсом  $G$ . Прямые пучков  $F$  и  $G$  определяют гармонические точки на прямых  $K_{3g}$  и  $K_P$  (рис. 3,в), которые образовали еще одну систему характерных точек. Треугольник  $FGM$  — автополярный.

Таким образом, координату любой точки

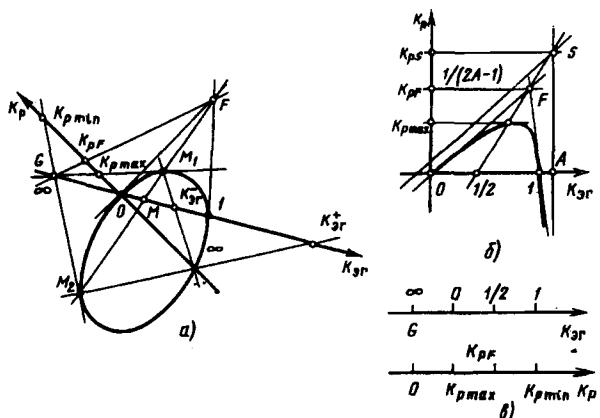


Рис. 3. Зависимость  $K_P(K_{3g})$ . Симметрия режима потребления и отдача энергии по цепи нагрузки: а — в проективной системе координат; б — в декартовой системе координат; в — характерные точки режимов по  $K_{3g}$  и  $K_P$

$D_1$  можно выразить в той или иной системе координат (по входу или нагрузке), выбрав три точки как базовые из этих характерных. Проективные координаты по оси  $K_P$  вычисляются непосредственно по значениям  $K_P$ , а по оси  $K_{\text{э.г}}$  — через проекцию точки  $D_1$  из полюса  $S$  или  $F$ . Чтобы также непосредственно работать со значениями  $K_{\text{э.г}}$ , отобразим точки кривой на ось  $K_{\text{э.г}}$  из бесконечно удаленной точки  $A_1$ , что соответствует на рис. 2,а обычной проекции на ось  $K_{\text{э.г}}$ .

В таблице для наглядности и удобства использования собраны все характерные точки по  $K_{\text{э.г}}$ . В связи с изложенным будем считать, что точки 0, 1 по оси  $K_{\text{э.г}}$  являются базовыми для цепи нагрузки, точки  $\infty, A$  — базовые по входу, а точки  $K_{\text{э.г}}^-, K_{\text{э.г}}^+$  — общие для этих систем координат и с базовыми точками образуют гармонические четверки, что проверяется непосредственными вычислениями.

$\infty$	$Y_{00}$	$Y_{\text{вх}}$	$Y_{\text{вх.с}}$	$0$	$-\Delta Y/Y_{00}$	$Y_{\text{вх}}$
$-Y_{11}$	$\infty$	$Y_{11}$	$Y_{\text{н.с}}$	0	$-\Delta Y/Y_{00}$	$Y_{\text{н}}$
$\infty$	0	$K_{\text{э.г}}$	$K_{\text{э.г}}^-$	1	$A$	$K_{\text{э.г}}$
$\infty$	$m(0)$	$m$	1	$m(1)$	0	$m$
-1		$\text{th } \theta$	0		1	$\text{th } \theta$
$\infty$	1	$r$	0	1	$\infty$	$r$

Далее будем использовать базовые точки  $\infty, A$  и  $K_{\text{э.г}}^-$  как единичную. В этой же таблице показаны соответствующие точки по таким переменным, как  $Y_{\text{н}}$  и  $Y_{\text{вх}}$ , согласно выражениям (7), (8). Тогда сложное отношение для текущего значения  $K_{\text{э.г}}$  через эти переменные примет вид

$$m(K_{\text{э.г}}) = (\infty K_{\text{э.г}}^- K_{\text{э.г}} A) = \frac{K_{\text{э.г}} - A}{K_{\text{э.г}}^- - A} = \frac{A - K_{\text{э.г}}}{\sqrt{A(A-1)}} = \quad (16)$$

$$= (\infty Y_{\text{вх.с}} Y_{\text{вх}} 0) = Y_{\text{вх}}/Y_{\text{вх.с}}. \quad (17)$$

Получили, что подобное сложное соотношение приводит к уже рассмотренному отклонению согласно выражениям (9), (11). С учетом сделанных замечаний вычислим сложные отношения для характерных точек 0, 1 по (16), (17), которые входят в систему координат по цепи нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} m(K_{\text{э.г}}=0) &= \sqrt{\frac{A}{A-1}} = \frac{Y_{00}}{Y_{\text{вх.с}}} = \sqrt{\frac{Y_{00} Y_{11}}{\Delta Y}}; \\ m(K_{\text{э.г}}=1) &= \frac{A-1}{\sqrt{A(A-1)}} = \sqrt{\frac{A-1}{A}}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Как и отмечалось, координаты точек (18) зависят от параметров (сравниваемых) цепей, т.е. от коэффициента  $A$ . Но эти выражения теперь позволяют провести обоснованное нормирование соотношений (16), (17) и получить чисто от-

носительную форму для отклонений.

**Отклонение режима как группа гиперболических поворотов.** В геометрии известно, что сложное отношение является основой для введения неевклидовых метрик. В нашем случае рассматриваемая кривая является гиперболой, а в возможном обобщении на многополюсник — гиперболоидом, на котором осуществляется модель гиперболической (Лобачевского) геометрии. Поэтому естественно использовать результаты этой геометрии, например, на основе модели Бельтрами [7], которая использует систему координат в виде автополярного треугольника. В этом случае (рис. 2,а) сторона  $SG$  является осью  $x$ , а  $SM$  — осью  $y$ . Прямые  $BS$  и  $AS$  — асимптоты гиперболы. В такой косоугольной системе кривая (12) приводится к виду

$$\frac{y^2}{5} - x^2 = A(A-1),$$

где переменные  $x, y$  связаны с исходными следующим образом:

$$K_P = -\frac{2y}{\sqrt{5}} + (2A-1), \quad K_{\text{э.г}} = A - x - \frac{y}{\sqrt{5}}. \quad (19)$$

Чтобы воспользоваться непосредственно результатами гиперболической геометрии, сделаем еще одну замену переменной, что соответствует переходу к прямоугольной системе координат (рис. 4), в которой последнее уравнение приводится к каноническому виду:

$$x_0^2 - x_1^2 = A(A-1) = R^2, \quad (20)$$

где  $x_0 = y/\sqrt{5}, x_1 = x$ .

Такая кривая (в общем случае поверхность) интерпретируется как сфера радиуса  $R$  в двумерном псевдоевклидовом пространстве или как одномерное гиперболическое пространство с тем же радиусом кривизны. В этом случае изменение режима определяется группой гиперболических поворотов на угол  $\theta$  (преобразования Лоренца):

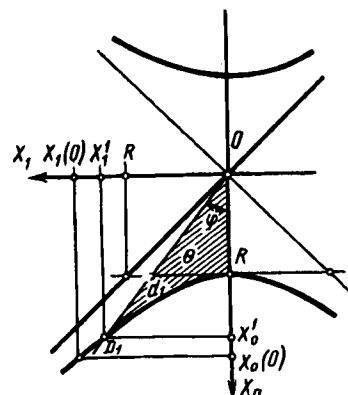


Рис. 4. Модель Бельтрами гиперболической геометрии

$$\begin{pmatrix} x_0^1 \\ x_1^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{ch} \theta & \operatorname{sh} \theta \\ \operatorname{sh} \theta & \operatorname{ch} \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Тогда гиперболическое расстояние в пространстве Лобачевского

$$S_{\Pi} = \theta R.$$

Это выражение подобно длине дуги обычной окружности. Пусть точка  $D_1$  соответствует этому углу  $\theta$ , а исходное положение — точке  $K_{P_{\max}}$ , когда  $x_0 = x_0^- = R, x_1 = 0$ . Согласно определению,  $\operatorname{th} \theta = \operatorname{tg} \varphi$ , где  $\varphi$  — евклидово значение этого угла. Тогда

$$\operatorname{th} \theta = x_1^1/x_0^1 = d_1/R < 1$$

и является координатой Бельтрами (см. также таблицу), которая соответствует точке  $d_1$  как проекции точки  $D_1$  на касательную прямую (плоскость)  $x_0 = R$ . Точки пересечения этой касательной с асимптотами определяют точки абсолюта — бесконечно удаленные, когда  $\operatorname{th} \theta = 1$ .

В этом случае расстояние

$$S_{\Pi} = R \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \operatorname{th} \theta}{1 - \operatorname{th} \theta}.$$

Используем расстояния для характерных точек 0, 1, которые, как показано ниже, будут равны по модулю между собой:

$$S_{\Pi}(0) = R \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \operatorname{th} \theta(0)}{1 - \operatorname{th} \theta(0)}.$$

Это расстояние примем за масштаб. Тогда отклонение выразим в виде нормированного выражения:

$$r = \frac{S_{\Pi}}{S_{\Pi}(0)}. \quad (22)$$

Определим входящие гиперболические функции. Величина

$$\frac{1 + \operatorname{th} \theta}{1 - \operatorname{th} \theta} = (\operatorname{ch} \theta + \operatorname{sh} \theta)^2.$$

Согласно (21) и заданному исходному положению (опуская индекс «1» нового положения) получаем

$$x_0 = x_0^- \operatorname{ch} \theta = \frac{y^-}{\sqrt{3}} \operatorname{ch} \theta = \frac{y}{\sqrt{3}};$$

$$x_1 = x_0^- \operatorname{sh} \theta = \frac{y^-}{\sqrt{3}} \operatorname{sh} \theta.$$

С учетом (19)

$$x_1 = A - K_{\Theta, \Gamma} - \frac{y^-}{\sqrt{3}} \operatorname{ch} \theta, \quad K_{\Theta, \Gamma} = A - \frac{y^-}{\sqrt{3}}.$$

Тогда

$$\operatorname{ch} \theta + \operatorname{sh} \theta = \frac{A - K_{\Theta, \Gamma}}{A - K_{\Theta, \Gamma}^-} = m(K_{\Theta, \Gamma}). \quad (23)$$

Полученное выражение соответствует (16), что позволяет его рассматривать как сложное отношение. Тогда для характерных точек согласно (23) и (18) имеем:

$$\operatorname{ch} \theta(0) + \operatorname{sh} \theta(0) = m(0);$$

$$\operatorname{ch} \theta(1) + \operatorname{sh} \theta(1) = m(1) = 1/m(0).$$

Так как логарифмы от обратных величин равны по модулю, то это определяет уже упомянутые одинаковые расстояния для характерных точек.

В конечном итоге выражение (22) приводится к виду:

$$r = \ln m(K_{\Theta, \Gamma}) / \ln m(0)$$

или

$$m(K_{\Theta, \Gamma}) = m^r(0). \quad (24)$$

В развернутой записи получаются следующие выражения:

$$\frac{A - K_{\Theta, \Gamma}}{A - K_{\Theta, \Gamma}^-} = \left( \frac{A}{A - K_{\Theta, \Gamma}^-} \right)^r = \left( \frac{A}{A-1} \right)^{r/2} = \quad (25)$$

$$= \frac{Y_{\text{вх}}}{Y_{\text{вх.с}}} = \left( \frac{Y_{00}}{Y_{\text{вх.с}}} \right)^r. \quad (26)$$

Левые части этих выражений представляют относительную величину отклонения, но это отклонение задается величиной  $r$  с учетом параметров цепи — правые части.

Подобные выражения удобным образом связывают исходные  $i$  и последующие  $(i+1)$  значения  $K_{\Theta, \Gamma}$  или  $Y_{\text{вх}}$  при целом ряде изменений режима (группе преобразований). Так как

$$m_{i+1}/m_i = m(0)^{r_{i+1}-r_i},$$

то

$$\frac{A - K_{\Theta, \Gamma}(i+1)}{A - K_{\Theta, \Gamma}^i} = \frac{Y_{\text{вх}(i+1)}}{Y_{\text{вх}i}} = \left( \frac{A}{A-1} \right)^{\frac{r_{i+1}-r_i}{2}}.$$

Если необходимо задать одинаковое отклонение  $r$  для разных цепей, то по правой части (25), (26) находим фактическое значение  $Y_{\text{вх}}$  или  $K_{\Theta, \Gamma}$ . В частности

$$K_{\Theta, \Gamma} = A - \sqrt{A(A-1)} \left( \frac{A}{A-1} \right)^{r/2}, \quad (27)$$

что также следует из (13).

Аналогичное выражение для  $K_U$  получается, если (26) подставить в (9).

Можно показать, что выражение  $(Y_{\text{вх}}/Y_{\text{вх.с}} + Y_{\text{вх.с}}/Y_{\text{вх}})$ , характерное для  $K_P$ , согласно (11) равно  $2\operatorname{ch} \theta$ . Тогда (11) определяет треугольник в псевдоевклидовой плоскости с двумя сторонами

$\operatorname{ch} \gamma, \operatorname{sh} \gamma$ , углом  $\theta$  между ними и  $\sqrt{K_p}$  как третьей стороной. В режиме согласования угол  $\theta$  равен нулю и все три стороны лежат на одной прямой.

В связи с этим уравнение четырехполюсника (6) можно аналогично (21) интерпретировать как гиперболический поворот вектора  $(U_1, I_1)$  на угол  $\gamma$ , что определяет новое положение с координатами  $(U_0, I_0)$ . Такие преобразования определяют инвариант [8]:

$$U_0^2 - \frac{I_0^2}{\Delta_Y} = U_1^2 - \frac{I_1^2}{\Delta_Y} \quad (\text{случай симметричного четырехполюсника}).$$

Подобное соотношение позволяет при произвольном режиме определить характеристическое сопротивление (измеряя величины  $I_1, U_1, I_0$ ). Далее можно использовать формализм подобных преобразований, которые в физике описывают относительное движение. Инвариант определяет семейство гипербол (для различных режимов от КЗ до ХХ), по которым движется вектор от выхода ко входу цепи и которые, таким образом, отображают друг на друга точки нагрузочной прямой и входной характеристики. Поэтому режим, как состояние цепи, рассматривается относительно двух систем отсчета — по цепи нагрузки и по входу. Его координаты в этих системах связаны преобразованием (6) как координаты точки в механике относительно двух инерциальных систем отсчета, а выражение (7), в свою очередь, соответствует релятивистскому правилу сложения скоростей этих объектов. Это следует из того, что его можно преобразовать к виду

$$Y_{\text{вх}} = \frac{Y_{\text{вх}}(\text{xx}) + Y_{\text{н}}}{1 + Y_{\text{вх}}(\text{xx}) Y_{\text{н}} / \Delta_Y},$$

что представляет, иначе, гиперболический тангенс суммы двух углов.

Подобная интерпретация в методическом плане объединяет рассматриваемые вопросы.

Аналогичные соотношения получим для системы координат по цепи нагрузки. Для этого также можно использовать автополярный треугольник на рис. 3,а,б, где прямые  $OF$  и  $1F$  являются асимптотами гиперболы. Чтобы не повторять весь ход рассуждений, воспользуемся уже полученным общим выражением (24).

Как уже раньше указывалось, точки 0, 1 являются базовыми, а точка  $K_{\text{э.г.}}$  — единичная. Тогда, аналогично (16), получим

$$M_{\text{н}}(K_{\text{э.г.}}) = (0 K_{\text{э.г.}}^- K_{\text{э.г.}} 1) = \frac{1 - K_{\text{э.г.}}}{K_{\text{э.г.}}} \sqrt{\frac{A}{A-1}} = \quad (28)$$

$$= (\infty Y_{\text{н.с.}} Y_{\text{н}} 0) = Y_{\text{н}} / Y_{\text{н.с.}}. \quad (29)$$

Аналогично получается отклонение согласно выражениям (9), (11). В этом случае масштаб за-

дается уже наоборот — точками  $\infty, A$ :

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{н}}(K_{\text{э.г.}}=\infty) &= - \frac{A}{A-1} = - \frac{Y_{11}}{Y_{\text{н.с.}}}; \\ m_{\text{н}}(K_{\text{э.г.}}=A) &= - \frac{A-1}{A}. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Отрицательные значения соответствуют тому, что точки  $\infty, A$  находятся во «внешней» области относительно базовых, что показано на рис. 5. Тогда их можно отобразить во «внутреннюю» область симметрично относительно базовых путем нахождения гармонически сопряженных. Для точки  $\infty$  сразу видно, что это  $1/2$ , а  $P_{\text{н}}$  — максимальная. Для точки  $A$  — это  $A/(2A-1)$ , что соответствует  $K_p=1/2$  (2A-1). Получается, что эта масштабная точка для разных кривых образует прямую линию (рис. 2,б), угол наклона которой равен  $45^\circ$ . Вычисления показывают, что  $m_{\text{н}}(K_{\text{э.г.}}=\frac{1}{2}) = -m_{\text{н}}(K_{\text{э.г.}}=\infty)$  и аналогично для второй точки.

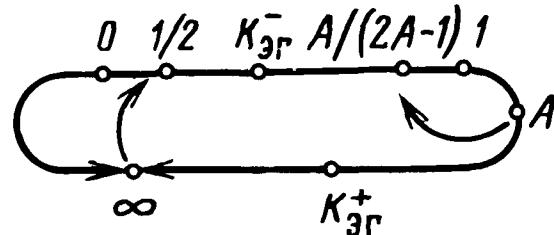


Рис. 5. Отображение масштабных точек во «внутреннюю» область базисных по цепи нагрузки

Теперь можем получить относительные выражения для отклонения аналогично (25), (26):

$$\frac{1 - K_{\text{э.г.}}}{K_{\text{э.г.}}} \sqrt{\frac{A}{A-1}} = \left( \frac{A}{A-1} \right)^{r_{\text{н}}/2} = \quad (31)$$

$$= Y_{\text{н}} / Y_{\text{н.с.}} = \left( \frac{Y_{11}}{Y_{\text{н.с.}}} \right)^{r_{\text{н}}}. \quad (32)$$

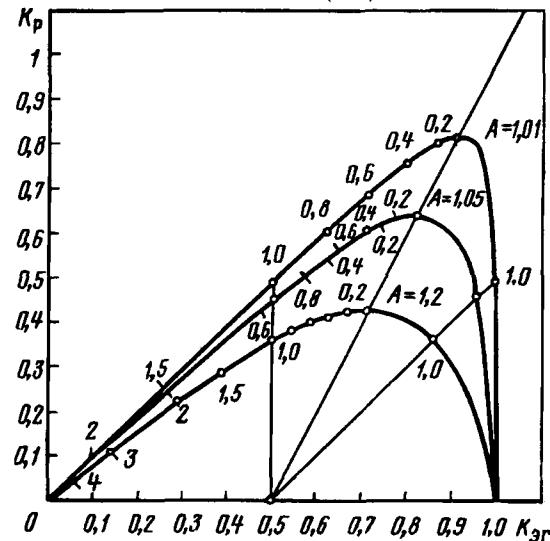


Рис. 6. Примеры равных отклонений ( $\Delta r = 0,2$ ) на кривых  $K_p(K_{\text{э.г.}})$  для различных цепей

Отсюда или из (13) получаем, что

$$K_{\text{Э.Г}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{A-1}{A}} \left( \frac{A}{A-1} \right)^{r_{\text{Н}}/2}}. \quad (33)$$

В качестве примера для трех значений  $A$ , равных 1,2; 1,05; 1,01 по выражению (33) рассчитаны отклонения с интервалом  $\Delta r=0,2$  и отложены на соответствующих кривых (рис. 6). По выражению (27) аналогично рассчитаны и отложены те же отклонения для кривой с  $A=1,05$ . Данный пример позволяет качественно оценить одинаковые отклонения для разных четырехполюсников на основе предложенных мер.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пенин А.А. Проективная эквивалентность режимов четырехполюсников с изменяемыми нагрузками — Электричество, 1993, № 8.

- Ефимов Н.В. Высшая геометрия. — М.: Наука, 1971.
- Четверухин Н.Ф. Проективная геометрия. — М.: Просвещение, 1969.
- Пенин А.А. Проективно-аффинные свойства резистивных четырехполюсников с изменяемой нагрузкой — Техническая электродинамика, 1991, № 2.
- Атабеков Г.И. Теория линейных электрических цепей. — М.: Советское радио, 1960.
- Пенин А.А. Передача энергии в электрической цепи с изменяемой нагрузкой. Проективно-геометрический подход. — Изв. АН Молдовы. Физика и техника, 1991, № 3.
- Постников М.М. Лекции по геометрии. Семестр II. Линейная алгебра. — М.: Наука, 1986.
- Головина Л.И. Линейная алгебра и некоторые приложения. — М.: Наука, 1975.

[18.05.93]

*Автор: Пенин Александр Анатольевич окончил радиотехнический факультет Одесского политехнического института в 1974 г. Работает ведущим инженером в Институте энергетики АН Молдовы, Кишинев.*

## Электромеханическое взаимодействие короткозамкнутого контура и криорезистивной обмотки, возбуждаемой от емкостного накопителя

БОЛЮХ В.Ф.

Рассмотрено электромеханическое взаимодействие неподвижной криорезистивной обмотки возбуждения с coaxиально установленным ускоряемым короткозамкнутым контуром. Разработана математическая модель, описывающая электромеханическое взаимодействие, которая учитывает теплофизические, магниторезистивные и механические нелинейности обмотки и контура. Решения системы нелинейных уравнений представлены в виде рекуррентных временных соотношений. Выполнен расчет и проведен анализ переходного процесса электромеханической системы при охлаждении активных элементов жидким азотом и динамическом возбуждении криорезистивной обмотки сверхкрическим током от емкостного накопителя энергии. Установлены теплофизические факторы и электромагнитные параметры накопителя, влияющие на эффективность электродинамического разгона короткозамкнутого контура.

Индукционный импульсный линейный электродвигатель [1–3] является одним из электромеханических устройств ударного действия, предназначенных для разгона массогабаритных объектов до высоких скоростей, возбуждения сейсмических и иных колебаний, упрочняющих и

*Electromechanical interaction of immovable cryoresistive excitation winding with coaxially mounted accelerated multiwinding short circuit has been developed. Mathematical model, which describes the interaction, takes into consideration thermal, magnetoresistive and mechanical nonlinearities. Solutions of unlinear equations system have been presented as recurrent temporary correlations. The numeral calculation and analysis of the transitional process in the electromechanical system have been conducted under condition of the active elements being cooled by liquid nitrogen and the cryoresistive winding being excited by above critical current from capacity accumulator. Thermal factors and electromagnetic peculiarities of the accumulator influence upon the efficiency of the electrodynamic short circuit acceleration have been determined.*

разрушающих ударов и др. Такой двигатель содержит одну или ряд статорных обмоток возбуждения, каждая из которых подсоединенена к накопителю энергии, и ускоряемый вторичный короткозамкнутый контур, при движении которого за счет электродинамического взаимодействия с

обмоткой, осуществляется импульсное возбуждение последующих обмоток путем воздействия на управляющие цепи коммутационных элементов [3, 4]. При этом обеспечивается быстродействие устройства, возможность бесконтактного движения вторичного контура относительно статора, высокие электромагнитные нагрузки активных элементов за счет кратковременности работы и т.д.

Использование криорезистивных обмоток возбуждения (КОВ) — обмоток из хорошо проводящих материалов, охлаждаемых криогенными жидкостями, например азотом, как одним из наиболее доступных и безопасных, позволяет за счет снижения активного сопротивления и увеличения добротности возбуждаемых контуров повысить электромагнитные нагрузки, эффективность преобразования энергии и уменьшить потери в устройствах ударного действия. При кратковременном возбуждении такой обмотки возможно значительное превышение критических токов, определяемых из условия теплового баланса для продолжительных режимов работы [5, 6]. Кроме того, с уменьшением времени работы в определенном диапазоне происходит возрастание критической нагрузки, что также может использоваться на практике в устройствах ударного действия. Однако при возбуждении криорезистивной обмотки током, превышающим критический, сверх определенного времени происходит резкое ухудшение условий охлаждения за счет изменения характера кипения криогенной жидкости, наблюдается бурное кипение, лавинообразно повышается температура проводника, снижается ток даже ниже критического и возможно повреждение КОВ [6].

Особенностью криорезистивных обмоток является то, что их сопротивление зависит как от теплофизических параметров и условий охлаждения, так и от магнитного поля из-за магниторезистивного эффекта [5–7]. Поэтому определение электромагнитных и других параметров в системе взаимодействующих обмоток и короткозамкнутых контуров, охлажденных криогенными хладагентами, представляет определенную проблему.

Рассмотрим электромеханическое взаимодействие неподвижной КОВ, погруженной в криостат с криогенной жидкостью и подключаемой к емкостному накопителю энергии, с предварительно охлажденным индуктивно связанным короткозамкнутым контуром (ИКК), коаксиально установленным относительно обмотки с возможностью аксиального перемещения вдоль оси  $z$ . Элементы КОВ и ИКК выполнены в виде круглых, плотно намотанных, многовитковых катушек из тонкого провода, причем наружный радиус ИКК меньше внутреннего радиуса КОВ на небольшую величину  $\delta$ , что позволяет ускоряющему контуру переме-

шаться вдоль ряда неподвижных обмоток с хорошей магнитной связью. При подключении КОВ к заряженному до напряжения  $U_0$  накопителю переходный процесс в электромеханическом объекте можно описать системой нелинейных уравнений:

$$i_1(t)r_1(T_1, \tilde{B}_1) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_0} \int i_1(t) dt + M(z) \frac{di_2}{dt} + i_2(t) \frac{dM}{dz} v(t) = 0; \quad (1)$$

$$i_2(t)r_2(T_2, \tilde{B}_2) + L_2 \frac{di_2}{dt} + M(z) \frac{di_1}{dt} + i_1(t) \frac{dM}{dz} v(t) = 0; \quad (2)$$

$$(T_n - T_{0n})P_n \alpha_n(T_n) + m_n C_n(T_n) \frac{dT_n}{dt} = i_n^2(t) r_n(T_n, \tilde{B}_n); \quad (3)$$

$$F_z(t) = m_2 a(t) + 2\pi\beta\delta R_2 h_2 v^2(t); \quad (4)$$

$$F_z(i_1, i_2, z) = i_1(t) i_2(t) \frac{dM}{dz}(z); \quad (5)$$

$$\tilde{B}_n(i_1, i_2) = \frac{0,25}{h_n b_n} \int_{\rho_{2n}}^{\rho_{1n}} \int_{z_{2n}}^{z_{1n}} [B_{\rho n}^2(t, z) + B_{zn}^2(t, z)]^{0,5} ds_n; \quad (6)$$

$$r_n(T_n, \tilde{B}_n) = 1,27 r_{0n}(T_n, \tilde{B}_n) l_n N_n d_n^{-2}, \quad (7)$$

где  $n=1, 2$  — индексы КОВ и ИКК;  $i_n(t)$ ,  $r_n(T_n, \tilde{B}_n)$ ,  $L_n$ ,  $C_n(T_n)$ ,  $m_n$ ,  $T_n$ ,  $P_n$ ,  $\alpha_n(T_n)$  — ток, сопротивление, индуктивность, теплоемкость, масса, усредненная температура, поверхность охлаждения, коэффициент теплоотдачи КОВ и ИКК;  $\tilde{B}_n(i_1, i_2)$  — усредненное значение индукции магнитного поля КОВ и ИКК;  $B_{\rho n}(t, z)$ ,  $B_{zn}(t, z)$  — радиальная и аксиальная компоненты магнитного поля, созданного совместно КОВ и ИКК;  $N_n$ ,  $R_n$ ,  $h_n$ ,  $b_n$ ,  $ds_n$ ,  $d_n$ ,  $l_n$  — число витков, средний радиус, полуширина, полувысота и элементарная площадка сечения, диаметр и длина среднего витка КОВ и ИКК;  $C_0$  — емкость накопителя;  $M(z)$  — коэффициент взаимоиндуктивности между КОВ и ИКК;  $v(t)$ ,  $a(t)$  — скорость и ускорение ИКК в момент времени  $t$ ;  $F_z(t) = F_z(i_1, i_2, z)$  — аксиальная сила электродинамического взаимодействия между КОВ и ИКК;  $T_{0n}$  — температура хладагента и окружающей среды;  $r_{0n}(T_n, \tilde{B}_n)$  — удельное сопротивление проводника;  $\beta$  — коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\delta$  — плотность среды перемещения ИКК;  $\rho'_{1n} = R_n + h_n$ ;  $\rho'_{2n} = R_n - h_n$ ;  $z'_{11} = b_1$ ;  $z'_{21} = -b_1$ ;  $z'_{12} = z(t) + b_2$ ;  $z'_{22} = z(t) - b_2$ .

Представленная модель из-за импульсного режима работы электромеханической системы не учитывает градиенты температур по обмотке и контуру, потери и индуктивность накопителя энергии, силы трения при движении контура. Поскольку представленная система уравнений су-

щественно нелинейна из-за характеристик  $r_{0n}(T_n)$ ,  $r_{0n}(\bar{B}_n)$ ,  $C_n(T_n)$ ,  $\alpha_n(T_n)$ ,  $M(z)$ ,  $v(t)$  и  $a(t)$ , то решения уравнений, описывающих электрические, теплофизические и динамические процессы для последующего расчета на ЭВМ удобно представить в виде рекуррентных соотношений.

Совместное решение уравнений (1) и (2) позволяет свести их к дифференциальному уравнению

$$a_3 \frac{d^3 i_n}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 i_n}{dt^2} + a_1 \frac{di_n}{dt} + a_0 i_n = 0, \quad (8)$$

где  $a_3 = L_1 L_2 (1 - K_M^2(z))$ ;  $a_2 = r_1(T_1, \bar{B}_1) L_2 + r_2(T_2, \bar{B}_2) L_1 - 2v(t) M(z) \frac{dM}{dz}$ ;  $a_1 = r_1(T_1, \bar{B}_1) r_2(T_2, \bar{B}_2) + + L_2 C_0^{-1} - v^2(t) \left( \frac{dM}{dz} \right)^2$ ;  $a_0 = r_2(T_2, \bar{B}_2) C_0^{-1}$ ;  $K_M(z) = \frac{M(z)}{\sqrt{L_1 L_2}}$  — коэффициент магнитной связи.

В зависимости от знака дискриминанты

$$D = \frac{1}{a_3^6} \left[ \left( \frac{a_1 a_3}{3} - \frac{a_2^2}{9} \right) + \left( a_2^3 - \frac{a_1 a_2 a_3}{6} + \frac{a_0 a_3^2}{2} \right)^2 \right] \quad (9)$$

кубического характеристического уравнения

$$a_3 z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0 = 0, \quad (10)$$

где  $z_1, z_2, z_3$  — его корни, возможны два вида решения. Если  $D \leq 0$ , решения уравнения (8) ищем в виде

$$i_n(t) = - \frac{i_m(t) v(t)}{r_n(T_n, \bar{B}_n)} \frac{dM}{dz} + A_{n1} e^{z_1 t} + + A_{n2} e^{z_2 t} + A_{n3} e^{z_3 t}, \quad (11)$$

где  $m=2,1$  при  $n=1,2$ ;  $A_{n1}, A_{n2}, A_{n3}$  — произвольные постоянные.

При этом все корни уравнения (10) действительны и равны

$$z_\epsilon = -2W \cos \left( \frac{\varphi_0}{3} + (\epsilon - 1) \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{a_2}{3a_3}, \quad (12)$$

где  $W = \frac{\text{sign } q}{3\sqrt{3}} \sqrt{\left| \frac{3a_1}{a_3} - \left( \frac{a_2}{a_3} \right)^2 \right|}$ ;  $\varphi_0 = \arccos \left( \frac{q}{2W^3} \right)$ ;

$$\epsilon = 1, 2, 3; q = (2a_2^3 - 9a_1 a_2 a_3 + 27a_0 a_3^2) (3a_3)^{-3}.$$

С учетом произвольных постоянных, определяемых в момент времени  $t_k$ , рекуррентные соотношения для токов принимают вид

$$i_n(t_{k+1}) = (\Delta z \theta)^{-1} \left\{ \left( e_{1n} - \frac{e_{1m}}{r_n(T_n, \bar{B}_n)} \frac{dM}{dz} \right) (y_1 z_2 z_3 + + z_1 y_2 z_3 + z_1 z_2 y_3) + \left( \frac{e_{2m}}{r_n(T_n, \bar{B}_n)} \frac{dM}{dz} - e_{2n} \right) \times \times [y_1 (z_2 + z_3) + y_2 (z_1 + z_3) + y_3 (z_1 + z_2)] + \times \left( e_{3n} - \frac{e_{3m}}{r_n(T_n, \bar{B}_n)} \frac{dM}{dz} \right) (y_1 + y_2 + y_3) \right\}, \quad (13)$$

где  $y_1 = (z_3 - z_2) e^{z_1 \Delta t}$ ;  $y_2 = (z_1 - z_3) e^{z_2 \Delta t}$ ;  $y_3 = (z_2 -$

$$\begin{aligned} &- z_2) e^{z_1 \Delta t}; \Delta z = z_2 z_3 (z_3 - z_2) + z_1 z_3 (z_1 - z_3) + z_1 z_2 \times \\ &\times (z_2 - z_1); \theta = 1 - \omega^2 r_1^{-1} (T_1, \bar{B}_1) r_2^{-1} (T_2, \bar{B}_2); \Delta t = \\ &t_{k+1} - t_k; e_{1n} = i_n(t_k) + \frac{\omega i_m(t_k)}{r_n(T_n, \bar{B}_n)}; e_{2n} = Q_n + \frac{\omega Q_n}{r_n(T_n, \bar{B}_n)}; \\ &e_{3n} = Q'_n + \frac{\omega Q'_n}{r_n(T_n, \bar{B}_n)}; Q_n = a_3^{-1} \{ i_n(t_k) [\omega M(z) - r_n(T_n, \bar{B}_n) L_m] + i_m(t_k) [r_m(T_m, \bar{B}_m) M(z) - \omega L_m] + \psi_n u_c(t_k) \}; \\ &\psi_1 = -L_2; \psi_2 = M(z); Q'_1 = a_3^{-2} \langle i_1(t_k) \{ r_1(T_1, \bar{B}_1) L_2 \times [r_2(T_2, \bar{B}_2) L_1 K_M^2(z) + r_1(T_1, \bar{B}_1) L_2 - C_0^{-1} a_3] - \omega M(z) \times (2r_1(T_1, \bar{B}_1) L_2 - \Omega) + L_1 L_2 \omega^2 (1 + K_M^2(z)) \} + i_2(t_k) a_2 \times \times [\omega L_2 - M(z) r_2(T_2, \bar{B}_2)] + u_c(t_k) L_2 (r_2(T_2, \bar{B}_2) L_1 K_M^2(z) + + r_1(T_1, \bar{B}_1) L_2 - 2M(z)\omega) \rangle; Q'_2 = a_3^{-2} \langle i_1(t_k) [(C_0^{-1} a_3 - - r_1(T_1, \bar{B}_1) \Omega) M(z) + \omega (2r_1(T_1, \bar{B}_1) M^2(z) + L_1 a_2)] + + i_2(t_k) [r_2(T_2, \bar{B}_2) L_1 (r_1(T_1, \bar{B}_1) L_2 K_M^2(z) + r_2(T_2, \bar{B}_2) L_1) - M(z) \omega (2L_1 r_2(T_2, \bar{B}_2) + \Omega) + \omega^2 L_1 L_2 (1 + + K_M^2(z))] + u_c(t_k) [L_1 L_2 \omega (1 + K_M^2(z)) - M(z) \Omega] \rangle; \omega = = v(t_k) \frac{dM}{dz}; \Omega = r_1(T_1, \bar{B}_1) L_2 + r_2(T_2, \bar{B}_2) L_1; u_c(t_k) — напряжение емкостного накопителя. \end{aligned}$$

Если для (10)  $D > 0$ , то решения уравнений (8) ищем в виде

$$i_n(t) = - \frac{i_m(t) v(t)}{r_n(T_n, \bar{B}_n)} \frac{dM}{dz} + E_{n1} e^{dt} + e^{ft} [E_{n2} \cos(gt) + + E_{n3} \sin(gt)], \quad (14)$$

где  $E_{n1}, E_{n2}, E_{n3}$  — произвольные постоянные;  $z_1 = d$  — действительный корень;  $z_{2,3} = f \pm jg$  — мнимые корни уравнения.

При  $a_2^2 > 3a_1 a_3$  выражения для корней имеют вид

$$d = -2W \operatorname{ch}(\varphi'/3); f = W \operatorname{ch}(\varphi'/3); g = \sqrt{3} W \operatorname{sh}(\varphi'/3),$$

а при  $a_2^2 < 3a_1 a_3$

$$d = -2W \operatorname{sh}(\varphi''/3); f = W \operatorname{sh}(\varphi''/3); g = \sqrt{3} W \operatorname{ch}(\varphi''/3),$$

где  $\varphi' = \operatorname{Arch}(0,5qW^{-3})$ ;  $\varphi'' = \operatorname{Arsh}(0,5qW^{-3})$ .

С учетом произвольных постоянных рекуррентные соотношения для токов в окончательном виде принимают вид

$$i_n(t_{k+1}) = \theta^{-1} \left( S_n - \frac{S_m v(t_k)}{r_n(T_n, \bar{B}_n)} \frac{dM}{dz} \right), \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{где } S_n = & [g^2 + (f-d)^2]^{-1} \{ [(g^2 + f^2) e_{1n} - 2fe_{2n} + e_{3n}] \times \\ & \times e^{d\Delta t} + e^{f\Delta t} \{ g^{-1} [d(f^2 - g^2 - fd) e_{1n} + (g^2 + d^2 - f^2) e_{2n} + + (f-d) e_{3n}] \sin(g\Delta t) + [d(d-2f) e_{1n} + 2fe_{2n} - e_{3n}] \times \\ & \times \cos(g\Delta t) \} \}. \end{aligned}$$

Решение уравнения (3) для температур КОВ и ИКК в виде рекуррентного соотношения имеет вид [8]

$$T_n(t_{k+1}) = T_{0n} + \frac{r_n(T_n, \bar{B}_n) i_n^2(t_k)}{P_n \alpha_n(T_n)} + \left[ T_n(t_k) - T_{0n} - \right.$$

$$-\frac{r_n(T_n, B_n) i_n^2(t_k)}{P_n \alpha_n(T_n)} \left] \exp \left( -\frac{P_n \alpha_n(T_n) \Delta t}{m_n C_n(T_n)} \right) \right). \quad (16)$$

Значения ускорения, скорости и координаты ИКК с использованием уравнений (4) и (5) можно представить следующим образом:

$$a(t_{k+1}) = \frac{i_1(t_k) i_2(t_k)}{m_2} \frac{dM}{dz} - \frac{2\pi\beta\sigma h_2 R_2 v^3(t_k)}{m_2}; \quad (17)$$

$$v(t_{k+1}) = v(t_k) + a(t_k) \Delta t; \quad (18)$$

$$z(t_{k+1}) = z(t_k) + v(t_k) \Delta t + 0,5a(t_k) \Delta t^2. \quad (19)$$

Составляющие результирующего магнитного поля КОВ и ИКК в точке  $(\rho_0, z_0)$  цилиндрических координат равны [9]:

$$B_{\rho n}(t_k) = -\frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^2 \frac{\lambda_n N_n i_n(t_k)}{4b_n h_n} \int_0^\pi \sum_{\nu=1}^2 \sum_{\xi=1}^2 (-1)^{\nu+1} \times \\ \times (-1)^{\xi+1} [X_\nu \cos \varphi + \rho_0 \cos^2 \varphi \times \\ \times \ln(X_{\nu\xi} + \rho'_{\nu n} - \rho_0 \cos \varphi)] d\varphi; \quad (20)$$

$$B_{zn}(t_k) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^2 \frac{\lambda_n N_n i_n(t_k)}{4b_n h_n} \int_0^\pi \sum_{\nu=1}^2 \sum_{\xi=1}^2 (-1)^{\nu+1} \times \\ \times (-1)^{\xi+1} (z_0 - z'_{\xi n}) \left[ \ln(\rho'_{\nu n} + X_{\nu\xi} - \rho_0 \cos \varphi) - \right. \\ \left. - \frac{\rho'_{\nu n} \rho_0^2 \sin^2 \varphi}{X_{\nu\xi} [X_{\nu\xi}^2 - (z_0 - z'_{\xi n})^2]} - \frac{\rho_0 \sin \varphi}{|z_0 - z'_{\xi n}|} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{arctg} \left( \frac{|z_0 - z'_{\xi n}| (\rho'_{\nu n} - \rho_0 \cos \varphi) \rho'_{\nu n}}{X_{\nu\xi} \rho_0 \sin \varphi} \right) \right] d\varphi, \quad (21)$$

где  $X_{\nu\xi} = [(z_0 - z'_{\xi n})^2 + \rho_0^2 + \rho'^2_{\nu n} - 2\rho_0 \rho'_{\nu n} \cos \varphi]^{0.5}$ ;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\lambda_n$  — коэффициент заполнения.

На основе расчета составляющих поля, используя (6), определяются усредненные индукции  $B_n(i_1, i_2)$  и находятся коэффициенты магнитной нагрузки КОВ и ИКК  $\gamma_n(t_k) = B_n(i_1, i_2) i_n^{-1}(t_k)$ , определяющие изменение их сопротивлений из-за магниторезистивного эффекта.

Взаимоиндуктивность между КОВ и ИКК, определяемая методом разложения в ряд Тейлора [10], можно выразить следующим образом:

$$M(z) = \frac{N_1 N_2}{6} \left[ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 M'(z(t_k), R_{1i}, R_{2j}) + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 M'(z_{ij}, R_{16}, R_2) - 2M'(z(t_k), R_1, R_2) \right], \quad (22)$$

где  $M' = \mu_0 \sqrt{R_{1i} R_{2j}} \left[ \left( \frac{2}{k} - k' \right) K - \frac{2}{k} E \right]$ ;  $R_{ny} = R_n + h_n [1 - 2(y-1)]$ ,  $y = i, j$ ;  $z_{ij} = z(t_k) + b_1 [1 - 2(j-1)]$ ;  $k' = \{(4R_{1i} R_{2j})[(R_{1i} + R_{2j})^2 + z_{ij}^2]\}^{0.5}$  — модуль полных

эллиптических интегралов первого  $K$  и второго  $E$  рода.

Рассмотрим электродинамическое взаимодействие КОВ и ИКК, охлаждаемых жидким азотом и предназначенных для линейного разгонного электродвигателя [4]. Элементы КОВ и ИКК выполнены в виде катушек со средним диаметром соответственно 0,1 м и 0,121 м, имеют поперечное квадратное сечение со сторонами 1,0 см. Они содержат по 400 витков медного провода диаметром 0,4 мм. В качестве базового источника питания используется конденсаторный накопитель емкостью  $C_0 = 500 \text{ мкФ}$ , заряженный до напряжения  $U_0 = 4 \text{ кВ}$ . Эффективность электромеханической системы оценим максимальной скоростью ИКК  $v_m$  и наибольшим КПД системы:

$$\eta(t) = m_2 C_0^{-1} U_0^{-2} v^2(t) 100\%.$$

Совместное решение на ЭВМ уравнений с учетом нелинейных параметров позволило промоделировать характер электромагнитных, тепловых и электродинамических процессов в системе и установить их особенности. Так, для достижения наибольшей силы отталкивания контура от обмотки, на характер и величину которой влияет целый ряд факторов, необходимо совмещение максимума градиента взаимной индуктивности с максимумами токов. Характер пространственного распределения функции  $dM/dz(z)$  зависит от геометрических параметров системы. На рис. 1

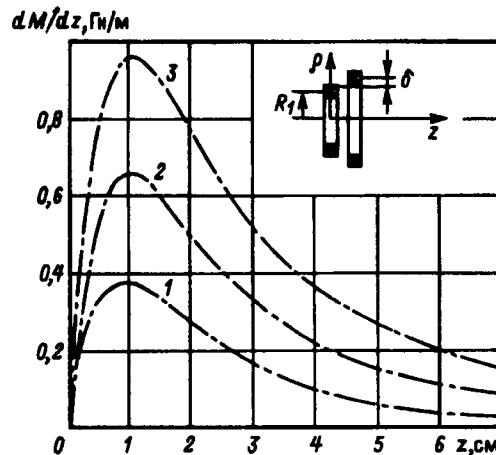


Рис. 1. Аксиальное распределение градиента взаимной индуктивности между КОВ и ИКК при значении среднего радиуса обмотки  $R_1$ : 1 — 0,0375 м; 2 — 0,0625 м; 3 — 0,0875 м

даны графики этой функции для системы с различными радиальными размерами, но при неизменных остальных ( $\delta = 0,5 \text{ мм}$ ). С увеличением размеров обмотки и контура увеличивается значение градиента, но его характер, в том числе положение максимума, сохраняется.

Для того чтобы понять динамику электри-

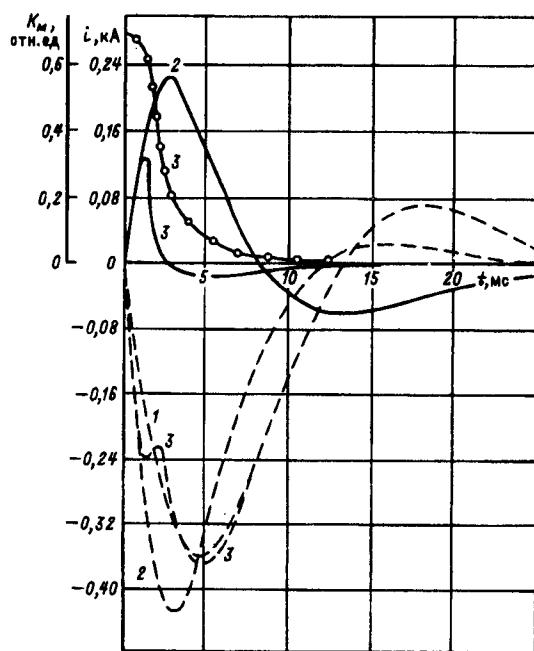


Рис. 2. Временные зависимости коэффициента магнитной связи и токов в КОВ и ИКК при: 1 —  $K_M(t) = 0$ ; 2 —  $K_M(t) = 0,7$ ; 3 —  $K_M(t) = \text{var}$ ; — ток в КОВ; — ток в ИКК

ческих параметров, на рис. 2 показан характер изменения токов в КОВ и в ИКК при отсутствии между ними магнитной связи, при удержании контура в единой плоскости с обмоткой ( $\xi(t)=0$ ,  $K_M(t)=0,7$ ), а также при индукционном ускорении контура [значение  $K_M(t)$  отмечено на рисунке кружками], когда начальное положение ИКК  $z_0=1$  мм. Процесс нарастания тока в обмотке в случае подвижного контура начинается практически как при неподвижном варианте, затем из-за уменьшения  $K_M$  в течение 1–2 мс наблюдается снижение тока, после чего процесс протекает практически также, как и в отсутствии контура. Индуцированный в ИКК ток в подвижном варианте по сравнению со стационарным меняется: после резкого всплеска длительностью до 3 мс, во время которого и происходит электродинамическое отталкивание, этот ток меняет направление и плавно затухает. Аксиальная сила также меняет знак как за счет электродинамического притяжения, так и за счет аэродинамического сопротивления.

На характер процессов в электромеханическом устройстве влияет начальная температура его активного элемента (рис. 3). С ее изменением помимо токов  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  меняется характер напряжения  $u_c(t)$ , температуры КОВ  $T_1(t)$  и аксиального перемещения ИКК  $z(t)$ . Из-за кратковременности импульса тока температура контура возрастает намного меньше, чем у КОВ. При охлаждении жидким азотом характер электромагнитных процессов в обмотке носит ко-

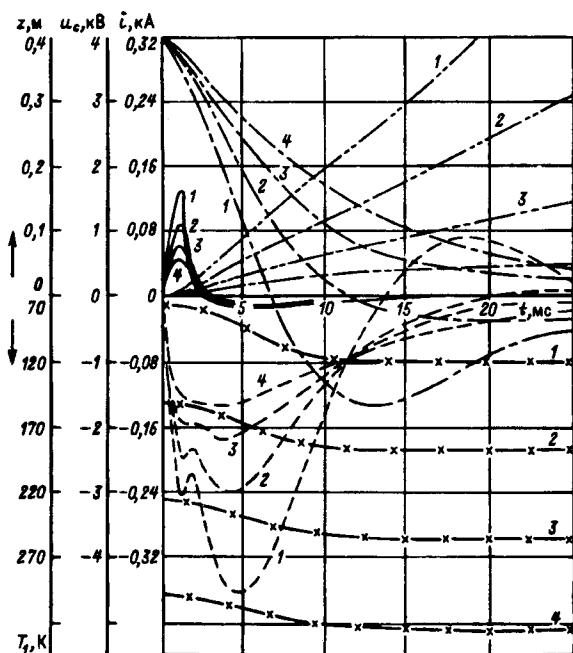


Рис. 3. Временные зависимости токов КОВ и ИКК, напряжения накопителя, температуры обмотки и аксиального перемещения контура при  $T_1(0)=T_2(0)$ : 1 — 77К; 2 — 151К; 3 — 255К; 4 — 299К; — напряжение  $u_c(t)$ ; —  $\times$  — температура КОВ  $T_1$ ; — аксиальное перемещение ИКК

лебательный, но быстро затухающий вид из-за возрастающего сопротивления. Возбуждение же «теплой» обмотки обуславливает апериодический характер процесса с относительно небольшой амплитудой тока. Характер тока в контуре в рассмотренных вариантах сохраняется, а меняется лишь амплитуда в первом полупериоде. С понижением начальной температуры максимальная скорость ИКК возрастает с 6,3 м/с при  $T_1(0)=T_2(0)=299\text{K}$  до 24,2 м/с при  $T_1(0)=T_2(0)=77\text{K}$ , что показывает перспективность применения криогенного охлаждения для индукционных машин и исполнительных механизмов ударного действия.

Изменение емкости накопителя при сохранении остальных параметров системы практически не меняет характеристик ИКК —  $i_2(t)$ ,  $T_2(t)$ ,  $v(t)$ , и  $z(t)$ , несмотря на существенное изменение параметров КОВ (рис. 4). С увеличением емкости напряжение  $u_c(t)$  и ток  $i_1(t)$  приобретают апериодический характер, большая часть энергии идет на нагрев КОВ и КПД системы снижается с 5,2% при  $C_0=250$  мкФ до 2,1% при  $C_0=750$  мкФ. Увеличение же начального напряжения накопителя приводит к росту амплитуды токов  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$ , хотя из-за повышения температуры и магнитных полей этот рост замедляется, так как повышается  $r_1(T_1, \vec{B}_1)$  (рис. 5). При этом обостряется пик тока  $i_2(t)$  в первом полупериоде, растет скорость  $v(t)$  и стремительно

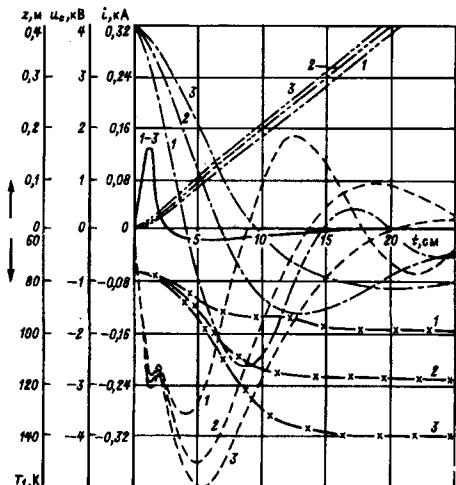


Рис. 4. Временные зависимости токов в КОВ и ИКК, напряжения накопителя, температуры обмотки и аксиального перемещения контура при емкости накопителя  $C_0$ : 1 — 250 мкФ; 2 — 500 мкФ; 3 — 750 мкФ

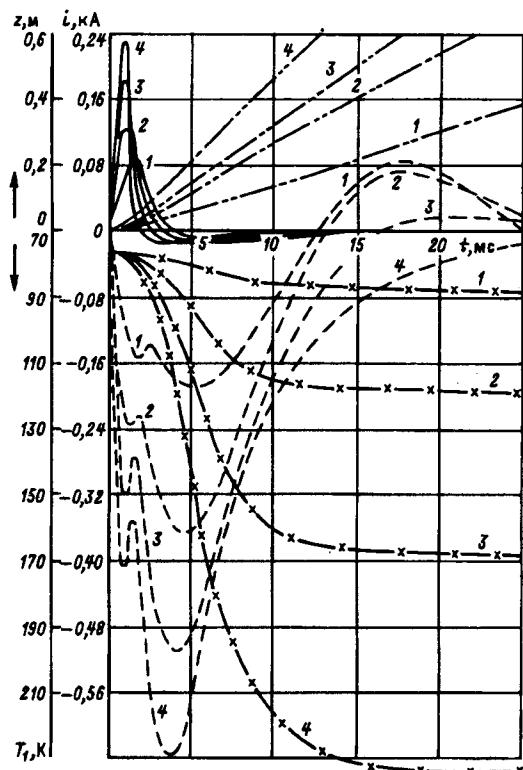


Рис. 5. Временные зависимости токов в КОВ и ИКК, температуры обмотки и аксиального перемещения контура при напряжении накопителя  $U_0$ : 1 — 2 кВ; 2 — 4 кВ; 3 — 6 кВ; 4 — 8 кВ

повышается нагрев КОВ несмотря на наличие жидкого хладагента. Увеличение напряжения  $U_0$  с 2 кВ до 8 кВ повышает температуру КОВ с 90 до 240 K, увеличивает максимальную скорость с 17,2 до 52,8 м/с, но снижает КПД системы с 5,9 до 3,5%.

Одновременное изменение емкости  $C_0$  и напряжения  $U_0$  источника питания при сохранении накопленной энергии показывает путь повышения

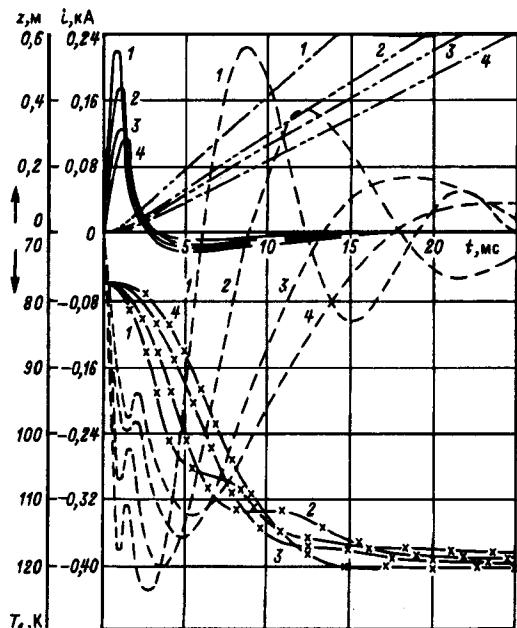


Рис. 6. Временные зависимости токов КОВ и ИКК, температуры обмотки и аксиального перемещения контура при запасенной энергии накопителя 4 кДж и емкости  $C_0$ : 1 — 125 мкФ; 2 — 250 мкФ; 3 — 500 мкФ; 4 — 750 мкФ

эффективности рассматриваемого устройства (рис. 6). Так, понижение  $C_0$  и увеличение  $U_0$  вызывает переход от апериодического электромагнитного процесса в КОВ к колебательному с уменьшением первого «рабочего» полупериода и возрастанием его амплитуды. При этом максимум тока  $i_1(t)$ , смещающийся к началу процесса, сближается с пиком тока  $i_2(t)$ , у которого растет лишь величина, и с максимумом функции  $dM/dz(z)$ . Следствием этого является повышение эффективности преобразования энергии: при  $C_0=750$  мкФ наибольшее значение  $\eta=3,6\%$ , а при  $C_0=50$  мкФ  $\eta=28,2\%$ .

Таким образом, применение криорезистивных обмоток, возбуждаемых емкостным накопителем до нагрузок, превышающих критические, позволяет повысить эффективность электромеханических индукционных систем ударного действия. При этом из-за сильного изменения сопротивления от теплофизических условий и возбуждаемых магнитных полей процессы в них носят нелинейный характер. Использование емкостного накопителя по сравнению с электромеханическим [9] не вызывает лавинообразного нагрева криорезистивных обмоток из-за быстрого затухания токов и предпочтительно при создании линейного импульсного электродвигателя ударного действия [4].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.Н., Бондалетов В.Н. Индукционное ускорение проводников и высокоскоростной привод. — Электричество, 1973, № 10, с. 35—41.
2. Gora T., Kemme P. Fast electromagnetic launchers. — IEEE Trans. on Magnetic, 1983, vol. 19, № 4, p. 1569—1571.

3. McKinney K., Mongeau P. Multiple stage pulsed induction acceleration. — IEEE Trans. on Magnetic, 1984, vol. 20, № 2, p. 239–242.

4. Болюх В.Ф., Данько В.Г., Чепурной А.П. Линейный импульсный индукционный электродвигатель с криорезистивными обмотками. — Тезисы докладов Международ. науч.-техн. семинара «Электромеханические системы с компьютерным управлением на автотранспортных средствах и в их роботизированном производстве» — г. Сузdal, 22–26 февраля 1993 г. — М.: МГААТМ (МАМИ), 1993, с. 71–72.

5. Zhomirsky L.S., Bandos T.V., Nechiporenko I.N. Critical currents in hyperconducting windings/— Cryogenics, 1985, vol. 25, № 7, p. 387–392.

6. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Работа криорезистивной обмотки возбуждения в кратковременном режиме. — Техн. электродинамика, 1990, № 5, с. 36–41.

7. Алиевский Б.Л., Шерстюк А.Г., Шебалин И.Ю. Переходные процессы в электрической цепи с магниторезистивной нелинейностью. — Изв. вузов. Электромеханика, 1977, № 2, с. 217–220.

8. Болюх В.Ф. Динамическое возбуждение криорезистивных обмоток электромеханических устройств ударного действия от емкостного накопителя энергии. — Техн. электродинамика, 1992, № 4, с. 61–68.

9. Болюх В.Ф. Электродинамическое взаимодействие криорезистивной обмотки возбуждения с индуктивно связанным контуром. — Техн. электродинамика, 1993, № 1, с. 6–12.

10. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей Справочная книга. — Л.: Энергоатомиздат, 1986, 488 с.

[26.04.93]

*Автор: Болюх Владимир Федорович окончил физико-технич. факультет Харьковского политехнического института (ХПИ) в 1979 г. по специальности «Криогенная техника». В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию в ХПИ по тематике, связанной с разработкой сверхпроводящих магнитов для линейных электромеханических преобразователей энергии. Доцент кафедры «Общая электротехника» ХПИ, Украина.*

## Расчет и свойства фильтров с элементами высших порядков

ЗЮССЕ Р., ДИМАР У., ХАРНИШ Т.

При реализации активных фильтров в микроэлектронном исполнении возникает проблема создания индуктивных катушек. Рассматривается возможность преобразования цепи с фильтром в систему, содержащую элементы высшего порядка. Это предложение связано с включением таких элементов в схемы фильтров. Продемонстрированы некоторые примеры преобразования характеристик полосовых фильтров шестого порядка. Применение метода элементов высшего порядка в теории фильтров имеет преимущества по сравнению с другими методами.

**Введение.** Электрические фильтры широко применяются в технике связи, однако при их микроэлектронном исполнении возникают известные технологические трудности реализации незаземленных индуктивностей. По этой причине классические *RLC*-структуры заменяют активными фильтрами и, в частности, фильтрами с элементами высших порядков, применение которых позволяет исключить из схемы фильтра индуктивные элементы. Преобразование частоты позволяет перейти от схемы фильтра низких частот (НЧ-прототипа) к схемам полосового, заграждающего или фильтра высоких частот. В настоящей статье показано, что для построения фильтров с элементами высших порядков пригодны лишь элементы определенных порядков. Рассмотрено также влияние преобразования частоты на схему таких фильтров.

**Элементы высших порядков.** Теории элементов высших порядков посвящены работы Чуа

*In the realization of active filters the problem of building inductive coils in microelectronic circuits occurs. A possibility of transforming the network into a system containing elements of higher order is considered. It is connected with the inclusion of such elements in filter structures. Some examples of the transfer characteristics of 6th order bandpass filters are given. The method of higher order elements is advantageous applied in the filter theory.*

[1] и Филиппова [2–3]. Общее математическое описание таких элементов задается неявным уравнением вида

$$p^\alpha y - f(p^\beta x) = 0, \quad (1)$$

где  $\alpha, \beta$  — произвольные целые числа;  $p = \frac{d}{dt} = \frac{d}{d(t/T_0)} = T_0 \frac{d}{dt}$  — нормированный дифференциальный или временной оператор;  $x, y$  — соответствующие характеристики элемента, в качестве которых для описания процессов в произвольных цепях может быть использована подходящая пара из четырех основных характеристик электромагнитного поля  $u(t), i(t), \psi(t), q(t)$ .

При  $\alpha, \beta \in \{0, -1\}$  для случая линейной зависимости из (1) следует описание известных резистивного, индуктивного, емкостного и мемристорного элементов. В общем случае при произвольных целых  $\alpha, \beta$  имеем описание абсолютно новых элементов — элементов высших порядков.

В случае линейной зависимости уравнение (1) можно в явном виде разрешить относительно одной из характеристик, например, выражая  $U$  через  $x$ , получаем соотношение вида

$$U = K p_{\beta-\alpha} x = K p^n x, \quad (2)$$

где  $n$  — порядок элемента.

Как известно, любой двухполюсный элемент может быть выполнен на основе зависимых источников тока или напряжения (рис. 1, а, б), сим-

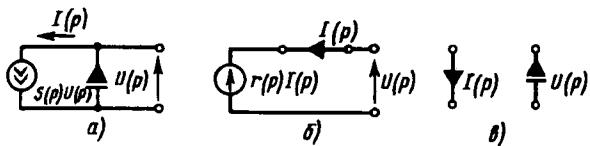


Рис. 1. Реализация двухполюсного элемента: а — на основе зависимого источника тока, управляемого напряжением; б — на основе зависимого источника напряжения, управляемого током; в — символы управляющих ветвей

волы управляющих ветвей [4] которых показаны на рис. 1, в. При этом для получения конкретного типа двухполюсника необходимо лишь обеспечить требуемые частотные зависимости для крутизны  $S(p)$  и управляющего сопротивления  $Z(p)$  используемых источников. Тогда для реализации элемента высшего порядка можно воспользоваться, например, каскадным соединением  $n$  одинаковых интеграторов (рис. 2). Если все интеграторы в

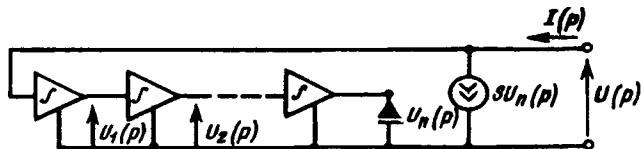


Рис. 2. Реализация элемента высшего порядка на основе каскадного соединения интеграторов и зависимого источника тока

составе этой цепи считать управляемыми напряжением, за цепочкой интеграторов следует применить зависимый источник тока, управляемый напряжением. Действительно, для цепи рис. 2

$$P(p) = \frac{K^n}{(1+pT)^n} SU(p) = \frac{S_0}{(1+pT)^n} U(p), \quad (3)$$

где  $T$  — постоянная времени интегратора;  $S_0 = K^n S$  — общий коэффициент передачи цепи.

Аналогично, применяя на выходе зависимый источник напряжения, для напряжения  $U(p)$  можно записать

$$U(p) = \frac{r_0}{(1+pT)^n} I(p). \quad (4)$$

Из (3), (4) получаем следующие выражения

для входного сопротивления соответствующих реализаций элементов высшего порядка

$$Z(p) = \frac{U(p)}{I(p)} = \frac{1}{S_0} (1+pT)^n \text{ и } Z(p) = \frac{r_0}{(1+pT)^n}. \quad (5)$$

При такой записи описанные выше элементы высших порядков могут рассматриваться как реальные элементы с потерями. Нетрудно заключить, что при условии  $\omega T >> 1$  влиянием потерь можно пренебречь, тогда сопротивления соответствующих идеальных элементов высших порядков (без потерь) представляются в виде

$$Z(p) = Mp^n \text{ и } Z(p) = \frac{1}{Dp^n}, \quad (6)$$

где  $M$  и  $D$  — обобщенные параметры указанных элементов, значения которых определяются схемой элемента, а также параметрами используемых интеграторов и зависимых источников. На рис. 3, а, б приведены соответствующие условные обозначения двухполюсных элементов высших порядков.

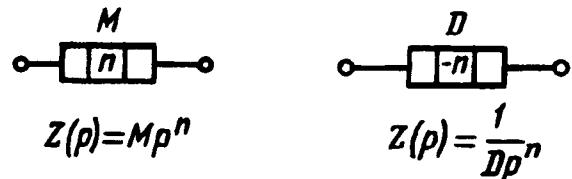


Рис. 3. Условные обозначения двухполюсных элементов высших порядков

В дальнейшем для сопротивления элемента высшего порядка будем использовать общую формулу

$$Z(p) = Mp^n, \quad (7)$$

где  $n$  — целое число ( $-\infty < n \leq \infty$ )

Преобразования цепи, приводящие к элементам высшего порядка. Для исключения индуктивных элементов из схемы фильтра используют преобразование Брутона [5], которое может быть применено как к отдельным элементам, так и к передаточной функции  $RLC$ -цепи. Преобразование Брутона, примененное к отдельным элементам цепи, заключается в умножении их сопротивления на безразмерный множитель  $(p\tau)^{-1}$ , где  $\tau$  — произвольный масштабирующий коэффициент. Сопротивления элементов после преобразования Брутона изменяются следующим образом:

активное сопротивление

$$R \rightarrow \frac{R}{p\tau} = \frac{1}{pC^*}, \text{ где } C^* = \frac{\tau}{R};$$

индуктивное сопротивление

$$pL \rightarrow \frac{L}{\tau} = R^*;$$

емкостное сопротивление

$$\frac{1}{pC} \rightarrow \frac{1}{p^2 C\tau} = \frac{1}{p^2 D^*}, \text{ где } D^* = C\tau.$$

Применение преобразования Брутона не изменяет характера частотной зависимости передачи фильтра (за исключением точки  $p=0$ , для которой требуется отдельное рассмотрение).

Таким образом, с помощью преобразования Брутона удается избежать индуктивных элементов, но в преобразованной цепи наряду с резистивным ( $R^*$ ) и емкостным ( $C^*$ ) элементами возникает элемент второго порядка с  $n=-2$  и параметром  $D^*$ .

Переход от фильтра пропускания низких частот (НЧ), полученного с помощью преобразования Брутона, к полосовому фильтру обычно выполняют, применяя преобразование частоты [6], представляющее собой формальную подстановку вида

$$p \rightarrow \frac{k}{p} \left\{ \frac{p}{\omega_0} + \frac{\omega_0}{p} \right\}, \quad (8)$$

где  $\omega_0$  — центральная частота синтезируемого полосового фильтра;  $k$  — некоторый коэффициент пропорциональности.

Преобразование (8) также может быть применено как к передаточной функции фильтра (если она известна), так и к каждому элементу его схемы. Применяя преобразование (8) к элементам высших порядков [7] и раскрывая выражение соответствующего полинома порядка  $n$ , после очевидных упрощений приходим к выводу, что при  $n > 0$  элемент высшего порядка после преобразования представляется цепочкой в виде последовательного соединения  $(n+1)$  элементов, значения порядков которых лежат в пределах от  $-n$  до  $n$ , причем порядки соседних элементов будут отличаться на два. Аналогично, при отрицательных значениях  $n$  исходный элемент высшего порядка после преобразования представляется параллельным соединением  $n+1$  элементов, порядки которых также отличаются на два и представляют собой набор целых чисел в диапазоне от  $-n$  до  $n$ . Для иллюстрации этого положения на рис. 4 представлены соответствующие элементы высшего порядка при  $n=6$  до и после преобразования частоты в соответствии с формулой (8).

**Условия пропускания для фильтров с элементами высших порядков.** Наименьшее число элементов, из которых может быть построен фильтр, равно двум ( $\Gamma$ -образное звено). Фильтры в виде симметричных Т- и П-образных звеньев (рис. 5) могут рассматриваться как согласованное каскадное соединение  $\Gamma$ -образных звеньев. Для характеристики меры передачи таких фильтров引进ится постоянная распространения  $g=b+ja$ , где

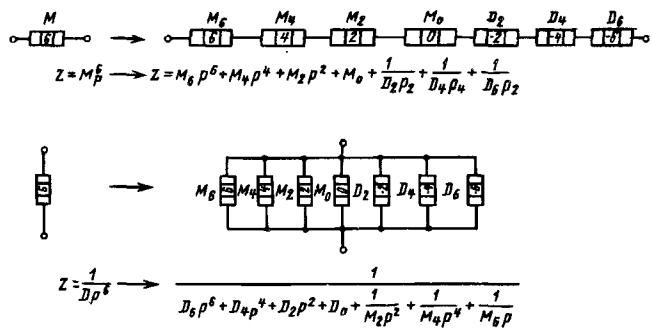


Рис. 4. Преобразование частоты для элемента высшего порядка при  $n=6$

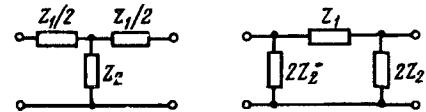


Рис. 5. Симметричные Т- и П-образные звенья

$b$  — постоянная затухания;  $a$  — коэффициент фазы звена. При этом мера передачи  $g$  симметричного Т- или П-образного звена представляет собой удвоенную меру передачи  $\frac{g}{2}$  Г-образного звена, для которого справедливо соотношение [8]

$$\operatorname{sh} \frac{g}{2} = \operatorname{sh} \left( \frac{b}{2} + j \frac{a}{2} \right) = \pm \sqrt{\frac{Z_1}{4Z_2}} \quad (9)$$

Если в качестве элементов Г-образного звена фильтра применить идеальные элементы высших порядков, сопротивления которых записаны в виде (7) при  $p=j\omega$ , то формулу (9) получим в виде

$$\operatorname{sh} \frac{g}{2} = \operatorname{sh} \frac{b}{2} \cos \frac{a}{2} + j \operatorname{ch} \frac{b}{2} \sin \frac{a}{2} = \pm -\sqrt{\frac{M_1}{4M_2}} (j\omega)^{\frac{n_1-n_2}{2}}. \quad (10)$$

Г-образный четырехполюсник приобретает свойства фильтра (наличие зоны пропускания, где  $b=0$ ) только в том случае, если правая часть (10) принимает чисто мнимые значения, что возможно при условии

$$n_1 - n_2 = 2(2m+1), \text{ где } -\infty \leq m \leq \infty. \quad (11)$$

Из (11) заключаем, что изменение порядка одного из элементов Г-образного звена на  $\pm 4m$  ( $m=1, 2, \dots$ ) не изменяет типа фильтра, разность порядков элементов звена всегда четна и принимает значения  $\pm 2, \pm 6, \pm 10$  и т. д., т. е. в безиндуктивных фильтрах могут быть использованы лишь элементы второго, шестого, десятого и других высших порядков.

В случае применения реальных элементов высших порядков (элементы с потерями) комплексные сопротивления которых запишем в форме  $(j\omega) = K(1+j\omega T)^n$ , формула (10) примет вид

$$\operatorname{sh} \frac{g}{2} = \pm \sqrt{\frac{K_1}{4K_2} \frac{(1+j\omega T_1)^{n_1}}{(1+j\omega T_2)^{n_2}}} = \sqrt{\frac{K_1}{4K_2}} \times \\ \sqrt{\frac{(1+\omega^2 T_1^2)^{n_1}}{(1+\omega^2 T_2^2)^{n_2}}} \exp \left[ j \frac{1}{2} (n_1 \operatorname{arctg} \omega T_1 - n_2 \operatorname{arctg} \omega T_2) \right]. \quad (12)$$

Из (12) следует, что фильтр обеспечит зону пропускания, если порядки его элементов удовлетворяют соотношению

$$n_1 \operatorname{arctg} \omega T_1 - n_2 \operatorname{arctg} \omega T_2 = (2m+1), \quad (13)$$

где  $-\infty < m < \infty$ .

При использовании в схеме элементов высших порядков интеграторов с одинаковыми постоянными времени  $T$  разность порядков элементов фильтра находится из условия

$$n_1 - n_2 = (2m+1) \pi / \operatorname{arctg} \omega T. \quad (14)$$

Заметим, что для идеальных элементов высших порядков  $\operatorname{arctg} \omega T \rightarrow \pi/2$ , и из (14) следует полученное ранее соотношение (11), которым можно воспользоваться для реальных интеграторов с большими значениями постоянной времени  $T$ , а также для области достаточно высоких частот.

Для иллюстрации эффективности применения в схемах фильтров элементов высших порядков рассмотрим частотные характеристики фильтра пропускания высоких частот (рис. 6), где  $R=10$  кОм,  $C=1$  нФ,  $Z(p)=Kp^n$ . Передаточная функция фильтра имеет вид

$$H(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{Kp^n}{R + 1/pC + Kp^n}. \quad (15)$$

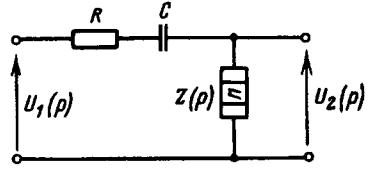


Рис. 6. Схема фильтра высоких частот с элементом высшего порядка ( $n=2,6$ )

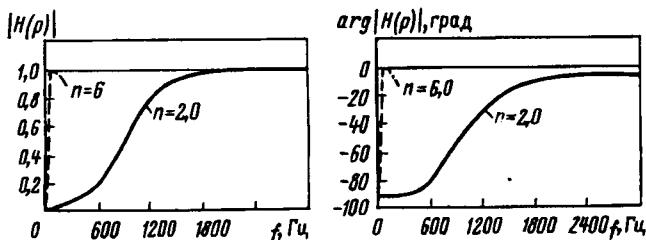


Рис. 7. Частотные характеристики фильтра (рис. 6) при  $n=2,6$ : а — АЧХ; б — ФЧХ

На рис. 7 представлены амплитудно- и фазочастотные характеристики такого фильтра при значениях порядка используемых элементов вы-

сших порядков  $n=2$  ( $K=1$  В·с<sup>2</sup>/А) и  $n=6$  ( $K=1$  В·с<sup>6</sup>/А), поскольку, как отмечалось выше, изменение порядка одного элемента Г-образного звена на  $\pm 4$  не изменяет типа фильтра. Рассмотрение рис. 7 показывает, что с ростом порядка используемого элемента отмечается значительное сужение ширины переходной зоны частотных характеристик фильтра.

**Заключение.** Показано, что элементы высших порядков могут быть эффективно использованы для исключения из схемы фильтра индуктивных элементов. Элементы высших порядков возникают естественным образом в результате применения к исходному  $RLC$ -фильтру преобразования Брутона, а также в случае использования преобразования частоты для получения полосовых фильтров из схемы НЧ-прототипа с элементами высших порядков. Порядки необходимых элементов в Г-образных звеньях таких фильтров определяются из условия существования зоны пропускания частотной характеристики фильтра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chua L.O. Device modelling via basic nonlinear circuit elements. — IEEE CAS, 1980, № 11, p. 1014—1044.
- Philippow E. Lineare und nichtlineare Transformationsvierpole — Grundlagen, Entwurf, Anwendung. — Zeitschrift fuer Elektrische Informations- und Energietechnik, 1977, № 7, S. 549—567.
- Philippow E., Rheinhardt M. Beitrag zur Theorie der kuenstlichen Elemente hoherer Ordnung. — 26 — IWK der Technischen Hochschule, Ilmenau, 1981, S. 19—26.
- Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем — Техника, 1970, 396 с.
- Bruton L.T. Network transfer function using the concept of frequency dependent negative resistance. — IEEE CT, 1969, № 16, p. 406—408.
- Antoniou A. Bandpass transformations and realization using frequency-dependent-negative-resistance elements. — IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, № 18, p. 297—299.
- Suesse R., Petrovski I. Transformation von Filtergrundfunktionen durch Frequenzumwandlung. — W.Z Technischen Hochschule Ilmenau, 1984, № 30, Н. 1, S. 97—102.
- Атабеков Г.И. Теория линейных электрических цепей. — М.: Советское Радио, 1960, 712 с.

[26.11.92]

Авторы: Зюссе Роланд в 1967 г. окончил факультет электротехники и информационной техники Высшей технической школы (ВТШ) в г. Ильменау (ГДР). В 1978 г. в ВТШ защитил докторскую диссертацию по вопросам синтеза нелинейных схем. Научный ассистент Технического университета (ТУ) г. Ильменау (Германия), академик Международной академии информатизации.

Димар Уте окончил в 1967 г. ВТШ в г. Ильменау. Научный ассистент ТУ г. Ильменау.

Харниши Горстен окончил в 1992 г. ТУ г. Ильменау. Научный ассистент этого университета.

# Применение модифицированного билинейного метода для диагностирования множественных отказов в линейных электрических цепях и системах

КАЗАКОВ О.И.

Изложены основы модифицированного билинейного метода диагностирования линейных электрических цепей и технических систем. Метод позволяет диагностировать одиночные отказы на уровне подсистем, которые вызваны множественными отказами на уровне элементов подсистем. Данный подход позволяет формировать множество допустимых неисправностей при малом количестве тестовых частот и измеряемых переменных системы.

В [1] и [2] был предложен модифицированный билинейный метод (МБМ) диагностирования, предназначенный для выявления одиночных отказов элементов линейных электрических *RLC*-цепей. В настоящей статье МБМ обобщается на случай диагностирования множественных отказов в подсхемах или подсистемах, когда одиночными являются отказы отдельных подсистем, и распространяется не только на электрические цепи, но и на линейные системы произвольной природы, определяемые передаточными функциями подсистем (звеньев) и топологией их соединения.

В общем виде постановка задачи диагностирования компонент линейных систем, задаваемых своими структурными схемами, рассматривалась, например, в [3]. Однако дальнейшие попытки решения этой задачи основывались на манипуляциях с коэффициентами дробно-рациональных функций, которыми описываются диагностируемые подсистемы [4, 5]. Такой подход ориентирован, прежде всего, на аналитическое, а не численное исследование системы, поскольку он оперирует экспериментальными значениями неисправных передаточных функций системы в аналитическом виде, а не их значениями в отдельных точках. Это ограничивает его применение в автоматизированных системах диагностирования.

С методологической точки зрения авторы указанных и ряда других публикаций, развивая математический формализм решения задачи, фактически не использовали билинейную форму зависимости между передаточной функцией системы и ее компонентами, которая в теории линейных электрических цепей известна как билинейная теорема Боде [6]. Применение билинейной зависимости позволяет решать задачу диагностирования более наглядным образом и методами, ориентированными на ЭВМ.

Пусть  $W(p)$  является передаточной функцией линейной системы, а  $W_i(p)$  — передаточной функцией  $i$ -го компонента системы. Тогда справед-

*A modified bilinear method of electric circuits and systems diagnosis is considered. The method diagnoses any single failures of the subsystems caused by common-mode failures of the subsystem elements. The approach enables us to determine possible failures set for a small number of test frequencies and system variables measured.*

лива билинейная зависимость

$$W(p) = \frac{a_i(p) W_i(p) + b_i(p)}{c_i(p) W_i(p) + d_i(p)}, \quad (1)$$

где  $a_i(p)$ ,  $b_i(p)$ ,  $c_i(p)$ ,  $d_i(p)$  — некоторые дробно-рациональные функции или полиномы комплексного параметра  $p$  ( $a$ -функции), независящие от передаточной функции  $W_i(p)$ . Для конкретных значений  $p$   $a$ -функции преобразуются в параметры ( $a$ -параметры), которые могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в [2].

Пусть одна из компонент системы неисправна и пусть известно экспериментальное значение передаточной функции системы  $\hat{W}(p)$ , которая получена одним из методов идентификации. Тогда, в соответствии с МБМ, на первом этапе диагностирования будем вычислять пробные передаточные функции  $\hat{W}_i(p)$  компонентов системы по формуле, обратной (1):

$$\hat{W}_i(p) = \frac{d_i(p) \hat{W}(p) - b_i(p)}{a_i(p) - c_i(p) \hat{W}(p)}, \quad (2)$$

где вычисления производятся для всех  $i$ -х подозреваемых в неисправности подсистем.

Определим характеристическую функцию билинейного преобразования (1):

$$\Delta_i(p) = a_i(p) d_i(p) - b_i(p) c_i(p). \quad (3)$$

Если  $\Delta_i(p)=0$ , то  $W(p)=a_i(p)/c_i(p)=b_i(p)/d_i(p)$  не зависит от  $W_i(p)$  и  $\hat{W}_i(p) = b_i(p)/a_i(p) = -d_i(p)/c_i(p)$  не зависит от  $\hat{W}(p)$ . Поэтому для частот, являющихся решением характеристического уравнения  $\Delta_i(p)=0$ , преобразования (1) и (2) не являются взаимнооднозначными. Поскольку реальные значения параметров исправных подсистем отличаются от номинальных в пределах установленных допусков, то функция преобразования (3) на множестве допустимых значений параметров подсистем будет определять некоторую область на комплексной плоскости, границы

которой могут быть найдены на основе теории допусков. Если данная область включает в себя начало координат, то использование МБМ для определения  $\hat{W}_i(p)$  по экспериментальной передаточной функции  $\hat{W}(p)$  неправомочно, поскольку чем меньше  $|\Delta_i(p)|$ , тем меньшее влияние  $W_i(p)$  оказывает на  $W(p)$ . И наоборот, чем дальше область допустимых значений  $\Delta_i(p)$  располагается от начала координат, тем выше точность определения  $\hat{W}_i(p)$  по формуле (2).

Вторым этапом диагностирования является сортировка пробных функций на допустимые и недопустимые. К допустимым относятся те функции, которые могут представлять собой неисправные подсистемы, а к недопустимым — те функции, для которых никакие значения параметров подсистемы, определяющих коэффициенты полиномов ее передаточной функции, не приводят эту передаточную функцию к данному виду. Очевидно, что основной задачей эффективного диагностирования является максимальное выявление недопустимых функций. Тогда множество допустимых функций определяет множество неопределенности, включающее в себя возможные неисправные подсистемы.

Решение задачи выявления недопустимых пробных функций в общем виде основано на принципе деградации параметров подсистемы: в неисправной подсистеме допускаются изменения значений нулей и полюсов передаточной функции, но не допускается увеличение их количества. Другими словами, возможно изменение коэффициентов полиномов числителя и знаменателя дробно-рациональной передаточной функции подсистемы, но не увеличение степени полиномов.

Рассмотрим пример аналитического исследования линейной системы с отрицательной обратной связью [4], иллюстрирующий применение МБМ для диагностирования неисправной системы для уровня подсистем.

*Пример 1.* На рис. 1 представлена структурная схема линейной системы с тремя звеньями, для

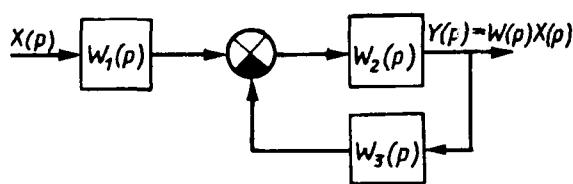


Рис. 1

которых номинальные передаточные функции равны:

$$W_1(p) = \frac{1}{p+2}, W_2(p) = \frac{2}{2p^2+1}, W_3(p) = \frac{2}{p}.$$

Пусть в результате идентификации получена передаточная функция неисправной системы

$$\hat{W}(p) = \frac{p}{(p+2)(2p^3+p+2)}.$$

Исходя из структурной схемы рис. 1 нетрудно записать в общем виде передаточную функцию системы

$$W(p) = \frac{W_1(p)W_2(p)}{1 + W_2(p)W_3(p)}.$$

Поскольку система достаточно простая, то можно, не используя  $a$ -функции, записать выражения для пробных функций каждой подсистемы и рассчитать их:

$$\begin{aligned}\hat{W}_1(p) &= \frac{(1+W_2(p)W_3(p))\hat{W}(p)}{W_2(p)} = \frac{2p^3+p+4}{2(p+2)(2p^3+p+2)}, \\ \hat{W}_2(p) &= \frac{\hat{W}(p)}{W_1(p) - W_3(p)\hat{W}(p)} = \frac{1}{2p^2+1}, \\ \hat{W}_3(p) &= \frac{W_1(p)W_2(p) - \hat{W}(p)}{W_2(p)\hat{W}(p)} = \frac{2p^3+p+4}{2p}.\end{aligned}$$

Анализ полученных пробных функций показывает, что в соответствии с принципом деградации параметров неисправной оказывается вторая подсистема с передаточной функцией  $\hat{W}_2(p)$ .

Несмотря на кажущуюся простоту рассмотренного метода решения задачи диагностирования, его использование для более сложных систем может вызвать непреодолимые трудности. Это связано, во-первых, с проблемой получения в аналитическом виде передаточной функции неисправной системы и, во-вторых, с возможным некорректным использованием принципа деградации параметров. В [5] были предложены методы учета погрешностей идентификации с помощью интервального анализа и линейного программирования, которые частично решали первую проблему. Вторая проблема в контексте задач диагностирования не обсуждалась.

Иллюстрацией некорректного использования принципа деградации параметров может служить пример диагностирования простейшей  $RLC$ -цепи по ее входному сопротивлению  $Z(p)$ . Пусть цепь состоит из двух последовательно соединенных двухполюсников, причем первый двухполюсник состоит из параллельного соединения катушки индуктивности с индуктивностью  $L$  и резистора с сопротивлением  $R_1$ , а второй — из конденсатора емкостью  $C$  и резистора с сопротивлением  $R_2$ . Пусть для номинального режима  $R_1=R_2=R$  и  $R^2=L/C$ , тогда  $Z(p)=R$  (дополняющие двухполюсники) [6]. Если в результате неисп-

равности указанные соотношения между параметрами цепи нарушаются, то входное сопротивление становится дробно-рациональной функцией от  $p$  с квадратичными полиномами числителя и знаменателя. Поэтому принцип деградации параметров должен применяться не для номинальной передаточной функции системы (в конкретном случае — входного сопротивления), а для передаточной функции общего вида, не учитывающей такие возможные соотношения параметров, которые приводят к появлению одинаковых нулей и полюсов или приравниванию нулю высших степеней полиномов. Последняя возможность имеет место, например, в сбалансированном мосте, нагрузочное сопротивление которого не оказывает влияния на входное сопротивление схемы для номинального режима. В случае режима баланса моста неисправность диагонального элемента никак себя не проявляет [ $\Delta(p) \equiv 0$ ].

Таким образом, использование принципа деградации параметров допустимо для передаточных функций подсистем общего вида, что повышает степень полиномов передаточной функции системы и размерность задачи в целом по сравнению с номинальным режимом и требует более детального исследования возможных неисправностей подсистем.

Другими критериями выявления недопустимых пробных передаточных функций могут являться, как правило, реально существующие физические ограничения на вид вещественной и мнимой частей передаточной функции или вид ее амплитуды и фазы. Например, уравнения для числителя и знаменателя входного сопротивления физически реализуемых пассивных двухполюсников должны удовлетворять условиям Гурвица. Кроме этого, действительная и мнимая части входного сопротивления связаны преобразованиями Гильберта, что остается справедливым и для передаточной функции минимально фазовых четырехполюсников. Теорема Пэли—Винера также накладывает определенные ограничения на вид модуля передаточной функции четырехполюсника физически реализуемой цепи. Отметим, что подобные оценки имеют интегральный характер и требуют аналитического представления передаточной функции. Интегральный метод физических ограничений является практически неприемлемым для случаев, когда известно относительно небольшое количество значений передаточной функции, полученных с помощью измерений.

Альтернативой использованию аналитического вида неисправной передаточной функции системы является численный подход, основанный на измерении и расчетах пробных функций для отдельных значений параметра  $p$ .

С точки зрения измерений конкретные значения комплексного параметра определяют входной (тестовый) сигнал системы в виде модулированной экспоненты. В частном случае, при  $\text{Re}(p)=0$ , имеем спектральную компоненту, измерение которой предполагает наличие достаточно простого измерительного оборудования (простейший анализатор цепей). В отличие от сигнала с экспоненциальным множителем, характеризующим время переходного процесса и требующим более сложной измерительной аппаратуры, синусоидальное воздействие позволяет непосредственно исследовать систему в частотной области, что является традиционной и достаточно триизиальной процедурой анализа электрических цепей и систем.

Однако получаемый набор значений пробных передаточных функций для отдельных значений параметра  $p$  не дает возможности непосредственно использовать принцип деградации параметров и интегральный метод физических ограничений, тем более, если малое количество полученных значений не позволяет восстановить (идентифицировать) передаточную функцию в аналитическом виде.

Под методом физических ограничений для численных расчетов будем понимать характерные области значений передаточных функций или коэффициентов полиномов, записанные в виде неравенств. Это могут быть ограничения, налагаемые на значения вещественной и мнимой частей передаточной функции или на ее коэффициент усиления и сдвиг фазы. Тогда нарушение этих неравенств позволит выявить недопустимые пробные передаточные функции.

Наиболее простым случаем является линейная система, диагностируемые подсистемы которой имеют один параметр. Пусть подсистемы представляют собой звенья: дифференцирующее звено —  $W_i(p) = pK_i$ , усиливающее звено —  $W_i(p) = K_i$ , интегрирующее звено —  $W_i(p) = K_i/p$ , где  $K_i$  — диагностируемый параметр  $i$ -й подсистемы.

Положим  $K_i > 0$  (например, звено — неинвертирующий усилитель), в противном случае будем записывать передаточную функцию со знаком минус (например, звено — инвертирующий усилитель). Будем также считать, что допустимой параметрической неисправностью подсистемы может являться изменение параметра  $K_i$ , но только в области положительных значений (например, неинвертирующий усилитель в результате неисправности не может стать инвертирующим и наоборот).

Тогда критериями выявления недопустимых пробных передаточных функций являются, во-первых, зависимость введенной в [3] диагностической функции  $m(W_i, p) = \hat{W}_i(p)/W_i(p)$  от  $p$  (на-

рушение принципа деградации параметров) и, во-вторых, появление значений параметров с отрицательным знаком (нарушение физических ограничений).

Данный класс задач включает в себя диагностирование электрических цепей по их  $RLC$ -параметрам [2]. Для линейных систем с однопараметрическими подсистемами результаты аналогичные. Отметим только, что под параметрами  $K_i$  для электрической схемы (например для линейных фильтров, собранных на операционных усилителях) понимаются не только  $RLCA$ -параметры элементов, но и их комбинации. В случае неисправности такого параметра может иметь место групповой отказ.

Частной задачей является диагностирование пассивных  $RLC$ -цепей по их входному сопротивлению или проводимости. Поскольку такие реальные радиоэлектронные изделия как резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т.д. с точки зрения моделирования ведут себя не как идеализированные элементы, а как некоторые схемы, «собранные» из идеализированных элементов, то представляет практический интерес диагностирование на уровне подсхем—двухполюсников.

По определению Бруне входное сопротивление пассивной  $RLCM$ -цепи  $Z(p)$  [как и проводимость  $Y(p)$ ] является положительной вещественной функцией, т.е. если  $\operatorname{Re}(p) \geq 0$ , то  $\operatorname{Re}[Z(p)] \geq 0$  или  $|\arg(p)| \leq \pi/2$ . Это свойство может послужить критерием выявления недопустимых значений пробных входных сопротивлений, когда в результате расчета получаем неравенство  $\operatorname{Re}[\hat{Z}_i(j\omega)] < 0$ . Для простейших цепей возможно также использование характерных ограничений на мнимую (реактивную) составляющую полного сопротивления. Например, для  $RLM$ -цепей  $\operatorname{Im}[Z(j\omega)] \geq 0$ , а для  $RC$ -цепей  $\operatorname{Im}[Z(j\omega)] \leq 0$ . Однако в случае численных расчетов необходимо предусмотреть существование небольших отклонений от указанных неравенств, вызванных неточностью исходных данных, ошибками округления и допустимым разбросом реальных значений параметров элементов около номинальных. Для иллюстрации диагностирования отказов двухполюсников в частотной области рассмотрим следующий пример.

*Пример 2.* На рис. 2 представлена диагностируемая по входному сопротивлению на пе-

ременном токе схема, состоящая из трех двухполюсников  $\underline{Z}_1=R_1+j\omega L$ ,  $\underline{Z}_2=R_2/(1+j\omega R_2 C)$ ,  $\underline{Z}_3=R_3$ . Номинальные значения параметров:  $R_1=5$  Ом,  $R_2=50$  Ом,  $R_3=200$  Ом,  $L=1$  мГн,  $C=10$  мкФ. Измеренные входные сопротивления  $\hat{Z}$  на частотах 100 и 1000 Гц соответственно равны  $64,83-j5,10$  и  $43,59+j10,42$ . Поскольку входное сопротивление данной цепи определяется по формуле  $\underline{Z}=(\underline{Z}_1+\underline{Z}_2)\underline{Z}_3/(\underline{Z}_1+\underline{Z}_2+\underline{Z}_3)$ , то из нее нетрудно получить выражения для  $a$ -функций:  $a_1=\underline{Z}_3$ ,  $b_1=\underline{Z}_2\underline{Z}_3$ ,  $c_1=1$ ,  $d_1=\underline{Z}_2+\underline{Z}_3$ ;  $a_2=\underline{Z}_3$ ,  $b_2=\underline{Z}_1\underline{Z}_3$ ,  $c_2=1$ ,  $d_2=\underline{Z}_1+\underline{Z}_3$ ;  $a_3=\underline{Z}_1+\underline{Z}_2$ ,  $b_3=0$ ,  $c_3=1$ ,  $d_3=\underline{Z}_1+\underline{Z}_2$ . Результаты расчетов по формуле (2) даны в таблице.

$i$	Частота, Гц	$\hat{Z}_i$	Допустимые (+) и недопустимые (-) функции
1	100	$49,99+j3,148$	+
2	100	$90,50-j11,78$	+
3	100	$-129,6+j157,4$	-
1	1000	$50,01+j31,41$	+
2	1000	$49,61+j10,68$	-
3	1000	$-8,234+j12,03$	-

Анализ таблицы показывает, что в данном случае достаточно одного опыта на частоте 1 кГц для выявления неисправного двухполюсника  $\hat{Z}_1$ . К сожалению, такой результат является скорее исключением, чем правилом. Вероятнее всего результаты расчетов будут иметь более скромный вид, аналогичный опыту на частоте 100 Гц. Поскольку неисправный двухполюсник имеет только два параметра, то несложно вычислить их реальные значения:  $\hat{R}_1=50$  Ом,  $\hat{L}=5$  мГн.

Отметим, что для подсистем с малым числом диагностируемых параметров эффективен прежде всего метод деградации параметров, тогда как для достаточно сложных многопараметрических подсистем единственным целесообразным средством выявления недопустимых пробных функций является метод физических ограничений, хотя его эффективность зависит как от вида неисправности, так и от значений тестовых частот.

Если производятся измерения нескольких передаточных функций, то выявление недопустимых пробных функций основывается на принципе инвариантности. Под принципом инвариантности понимается следующее ключевое свойство уравнения (2): если  $i$ -я подсистема неисправна, то расчет  $\hat{W}_i(p)$  по формуле (2) не зависит от выбора измеряемой функции системы  $\hat{W}(p)$ ; необходимо только, чтобы  $\Delta_i(p) \neq 0$ . Поэтому существует определенная гибкость между выбором количества тестовых частот  $p$  и количеством измеряемых (при фиксированных  $p$ ) значений системных функций. Разумеется, что при достаточно большом количестве доступных для измерения переменных

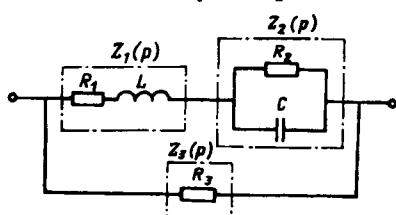


Рис. 2

системы рационально использовать другие методы диагностирования, поскольку преимущества МБМ пропадают.

В заключение следует подчеркнуть, что настоящая статья не столько решает поставленную задачу, сколько ставит вопросы и обсуждает пути их решения. Полагаю, что практические нужды технической диагностики определят более конкретно те области применения предлагаемых подходов, учитывающих специфику диагностируемых устройств и систем, для которых эти подходы окажутся наиболее эффективными.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков О.И. Частотный метод диагностирования электрических цепей.— Электричество, 1992, № 4.
2. Казаков О.И. Модифицированный билинейный метод

диагностирования одиночных отказов элементов электрических цепей.— Электричество, 1993, № 4.

3. Корноушенко Е.К. Поиск неисправных компонент в линейных системах, заданных структурными схемами. 1.— Автоматика и телемеханика, 1985, № 3.

4. Парамонова Г.Г. Об одном подходе к определению неисправностей в линейных динамических системах.— Автоматика и телемеханика, 1986, № 4.

5. Парамонова Г.Г. Обнаружение неисправных звеньев в линейных системах с учетом погрешности идентификации.— Автоматика и телемеханика, 1990, № 2.

6. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью.— М.: Гос. изд-во иностр. лит-ры, 1948.

[05.08.92]

*Автор: Казаков Олег Игоревич в 1984 г. окончил факультет гидравлики и систем управления Московского автомобильно-дорожного института. Директор фирмы «ОЛЕГ» (Москва).*

## Модель распределения зарядов при заполнении резервуаров слабопроводящими жидкостями

ГАЛКА В.Л., ЩИГЛОВСКИЙ К.Б.

Статья посвящена вопросу обеспечения электростатической безопасности при заполнении резервуаров. Рассматривается перенос объемного электрического заряда потоком слабопроводящей жидкости. Получена математическая модель, описывающая распределение заряда в заполненной части резервуара. Предложены схема расчета средств снижения электростатической опасности и способ оценки их эффективности.

Слабопроводящие жидкости, к которым относится большинство светлых нефтепродуктов, при движении относительно других сред способны генерировать и при определенных условиях накапливать электрические заряды. В создаваемом этими зарядами электрическом поле над свободной поверхностью жидкости возможны разряды статического электричества с энергией, достаточной для воспламенения смеси паров жидкости с кислородом воздуха. Зная интенсивность генерации электрических зарядов и их распределение в жидкости, можно оценить величины напряженности и потенциала электрического поля в парогазовом пространстве, определяющих, в конечном счете, вероятность такого воспламенения.

Уравнения, описывающие перенос заряда в жидкости посредством диффузии, электропроводимости и конвекции, имеют вид [1]:

$$\bar{j}_+ = -D_+ z_+ F \nabla c_+ - \gamma_+ \nabla \varphi + \bar{v} z_+ F c_+; \quad (1)$$

$$\bar{j}_- = D_- z_- F \nabla c_- - \gamma_- \nabla \varphi - \bar{v} z_- F c_-, \quad (2)$$

The article refers to the question of electrostatic safety when filling reservoirs. The transfer of the volume electric charge by the flow of the low conductive liquid is the subject of the investigation. A mathematical model was got as a result. This model shows the distribution of the electric charge in the filled part of the reservoir. A calculation scheme of the means reducing the electrostatic danger as well as the estimation method of the effectiveness is proposed.

где  $j_{\pm}$  — векторы объемных плотностей тока положительных и отрицательных ионов в жидкости;  $D_{\pm}$  — коэффициент диффузии ионов,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $z_{\pm}$  — валентность ионов;  $F$  — число Фарадея, 96500 Кл/моль;  $c_{\pm}$  — концентрация ионов, моль/ $\text{м}^3$ ;  $\gamma_{\pm} = b_{\pm} z_{\pm} c_{\pm} F$  — удельная электропроводимость жидкости, Кл/(В·с·м);  $b_{\pm} = \frac{z_{\pm} D_{\pm}}{RT}$  — подвижность носителей зарядов,  $\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$ ;  $R$  — универсальная (молярная) газовая постоянная, 8,315 Дж/(моль·К);  $T$  — температура, К;  $\varphi$  — электрический потенциал, В;  $\bar{v}$  — вектор скорости потока жидкости,  $\text{м}/\text{с}$ .

При известном распределении поля скоростей жидкости  $\bar{v}$  и соответствующих граничных условиях уравнения (1) и (2), в общем случае, пригодны для любой произвольной области жидкости. В [2] они используются для определения тока зарядки при движении жидкости в трубе. Применение же уравнений (1) и (2) в их исходном виде для других областей жидкости, в

частности, для заполненной части резервуара, неоправданно усложнило бы задачу расчетной оценки электрического поля в нем.

В реальных условиях заполнения резервуаров слабопроводящими жидкостями можно систему заполнения разделить на две основных части: область генерации и область накопления зарядов. В первой области — трубопроводе, происходит преимущественно разделение электрических зарядов, и уравнения (1) и (2), а также в целом результаты работы [2] могут быть использованы для определения величины заряда, поступающего с жидкостью в резервуар. Во второй области — резервуаре, происходит, в основном, релаксация заряда (генерацией заряда здесь в силу небольшой скорости перемещения жидкости относительно стенок резервуара можно пренебречь), и уравнения (1) и (2) для этой области можно существенно упростить. При этом входными данными для решения данной задачи могут служить результаты, полученные для первой области.

Принимая для удобства  $z_{\pm}=1$  и  $b_+=b_-=b$ , обозначаем  $\gamma^0=b \cdot c^0 \cdot F$  — электропроводимость незаряженной жидкости с концентрацией ионов  $c^0$ . При истечении жидкости в резервуар концентрация изменится на некоторую величину  $\delta c=c_+-c_-$ , следовательно, и электропроводимость жидкости изменится и станет равной

$$\gamma = \gamma^0 + b \delta c F. \quad (3)$$

Изменение концентрации ионов приводит к появлению объемного заряда  $\rho=\delta c F$ . Тогда

$$\gamma = \gamma^0 + b\rho. \quad (4)$$

Суммируя уравнения (1) и (2) и подставляя выражение (4), получаем

$$j = -D\nabla\rho + (\gamma^0 + b\rho)\bar{E} + \bar{\nu}\rho, \quad (5)$$

где  $\bar{E}=-\nabla\varphi$  — вектор напряженности электрического поля В/м.

Поскольку  $\nabla j = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ , а для несжимаемой жидкости  $\nabla\bar{\nu}=0$ , уравнение (5) приводится к виду

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - D\Delta\rho + \gamma^0\nabla\bar{E} + b\rho\nabla\bar{E} + b\bar{E}\nabla\rho + \bar{\nu}\nabla\rho = 0. \quad (6)$$

Известно, что подвижность носителей заряда определяется как отношение направленной скорости носителей  $\bar{\nu}_q$ , обусловленной электрическим полем, к напряженности этого поля [3], т.е.

$$\bar{\nu}_q = b\bar{E}, \quad (7)$$

а электрофизические свойства слабопроводящих жидкостей характеризуются постоянной времени релаксации заряда в них, которая может быть определена соотношением [4]

$$\tau = \frac{\varepsilon_0 \epsilon}{\gamma^0}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость жидкости.

Подставляя в уравнение (6) соотношения (7) и (8) и с учетом уравнения Пуассона

$$\nabla\bar{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \epsilon}, \quad (9)$$

получаем математическую модель распределения объемного заряда в заполненной жидкостью части резервуара:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - D\Delta\rho + \frac{\rho}{\tau} + \frac{b}{\varepsilon_0 \epsilon} \rho^2 + (\bar{\nu}_q + \bar{\nu}) \nabla\rho = 0, \quad (10)$$

которая является общей и может быть использована для различных частных случаев оценки электрических полей, создаваемых движущимися слабопроводящими жидкостями.

Рассмотрим реальный технологический процесс, связанный с заполнением прямоугольных резервуаров светлыми нефтепродуктами.

С целью сравнения степени влияния каждого из членов уравнения (10) на формирование электрического поля образуем безразмерные скаляры, векторы и операторы, обозначив их верхним индексом (\*), для чего применим известные методы теории подобия [5].

Введем обозначения  $x^* = \frac{x}{L}$ ,  $y^* = \frac{y}{L}$ ,  $z^* = \frac{z}{L}$ ,  $\rho^* = \frac{\rho}{\rho_0}$  и  $t^* = \frac{t}{T}$ , где  $L$  — характерный размер прямоугольного резервуара;  $\rho_0$  — значение начальной плотности объемного заряда, поступившего из трубопровода;  $T$  — рассматриваемый промежуток времени. В данном случае  $T=\tau$ , так как за пределами времени релаксации заряда электростатическое поле этим зарядом не создается. Тогда

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho_0}{\tau} \frac{\partial \rho^*}{\partial t^*}; \quad (11)$$

$$\nabla\rho = \frac{\rho_0}{L} \nabla\rho^*; \quad (12)$$

$$\Delta\rho = \frac{\rho_0}{L^2} \Delta\rho^*. \quad (13)$$

С учетом (11) и (13) уравнение (10) приводится к виду

$$\frac{\rho_0}{\tau} \frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} - \frac{D\rho_0}{L^2} \Delta\rho^* + \frac{\rho_0}{\tau} \rho^* + \frac{b\rho_0^2}{\varepsilon_0 \epsilon} (\rho^*)^2 + \frac{\rho_0}{L} (\bar{\nu}_q + \bar{\nu}) \nabla\rho^* = 0$$

или

$$\frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} - \frac{D\tau}{L^2} \Delta\rho^* + \rho^* + \frac{b}{\gamma^0} \rho_0 (\rho^*)^2 + \frac{\tau}{L} \bar{\nu}_q \nabla\rho^* + \frac{\tau}{L} \bar{\nu} \nabla\rho^* = 0. \quad (14)$$

Из [2] следует, что  $D=10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Постоянная времени релаксации заряда для светлых нефте-

продуктов в реальных условиях их транспортировки не превышает нескольких секунд. Следовательно,  $D\tau \ll L^2$  и вторым членом в уравнении (14) можно пренебречь.

Введем  $E=E_0 E^*$  и выполним преобразование для уравнения Пуассона

$$\frac{E_0}{L} \nabla \bar{E}^* = \frac{\rho_0}{\epsilon_0 \epsilon}, \text{ т.е. } \frac{E_0}{L} \sim \frac{\rho_0}{\epsilon_0 \epsilon}. \quad (15)$$

В этом случае сумма четвертого и пятого членов уравнения (14) принимает вид

$$\frac{b}{\gamma} \rho_0 (\rho^*)^2 + \frac{\tau}{L} \bar{v}_q \nabla \rho^* = \frac{FD\tau}{RT} \frac{\rho_0}{\epsilon} [(\rho^*)^2 + \nabla \rho^*]. \quad (16)$$

Подставляя в (16) численные значения  $F=96500$  Кл/моль;  $R=8,3$  Дж/(моль·К);  $T=300$  К;  $\epsilon_0 \epsilon = 2 \cdot 10^{-11}$  Ф/м и  $\rho_0 = 3 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>3</sup> [6], получаем, что для данного технологического процесса соотношением (16) можно также пренебречь. Тогда уравнение (14) приводится к виду

$$\frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \rho^* + \frac{\tau}{L} \bar{v} \nabla \rho^* = 0$$

или

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{\tau} + \bar{v} \nabla \rho = 0, \quad (17)$$

которое является уравнением переноса заряда, и его решение представляется в виде

$$\rho = \rho_0 \exp \left( -\frac{t}{\tau} \right). \quad (18)$$

В зависимости от гидродинамических условий потокораспределения светлых нефтепродуктов уравнение (18) может конкретизироваться. Так, в работе [7] оно рассматривается для линейного течения жидкости как

$$\rho = \rho_0 \exp \left[ -\frac{1}{\tau} \int_0^l \frac{dl}{v(l)} \right], \quad (19)$$

где  $l$  — координата, отсчитываемая вдоль линии тока жидкости.

При плоскопараллельном течении [ $v=v(x, y)$ ]

$$\rho = \rho_0 \exp \left( -\frac{z}{w\tau} \right), \quad (20)$$

а при истечении жидкости из сосредоточенного («точечного») источника

$$\rho = \rho_0 \exp \left( -\frac{4\pi L^3}{3w\tau} \right), \quad (21)$$

где  $w$  — расход жидкости;  $L$  — расстояние от источника.

Из уравнений (18)–(21) следует, что закон временного изменения плотности объемного заряда в рассматриваемом случае не зависит от

геометрии рассматриваемой области и условий на ее границах, а определяется электрофизическими свойствами жидкости, функцией распределения ее скоростей и начальной плотностью объемного заряда, которая вычисляется из соотношения

$$\rho_o = \frac{I_3}{w}. \quad (22)$$

Здесь  $I_3$  — ток заряжения нефтепродукта в трубопроводе, вычисляемый по эмпирической формуле [8]:

$$I_3 = \frac{A_i v^{F_i} d^{S_i}}{1,14 - 2 \lg h_3/d}, \quad (23)$$

где  $A_i$  — эмпирический коэффициент, соответствующий  $i$ -му типу нефтепродукта;  $v$  — линейная скорость течения нефтепродукта по трубопроводу, м/с;  $d$  — внутренний диаметр трубопровода, м;  $h_3$  — эквивалентная высота шероховатости на внутренней поверхности трубопровода, м;  $F_i$  — показатель степени при скорости для  $i$ -го типа нефтепродукта.

Значения коэффициентов и показателей для различных типов нефтепродуктов известны и таким образом величина  $\rho$  может быть рассчитана.

В частности, расчеты плотности объемного заряда для точечного гидродинамического источника показывают, что у концевого элемента входной трубы образуется ядро заряда. Это объемное скопление заряда, в котором значение  $\rho$  медленно убывает, имеет вид полусферы. Ядро вытягивается по направлению к стенкам резервуара и приобретает форму половины сплюснутого эллипсоида, при этом малая ось эллипсоида быстро уменьшается.

Рассмотрим электрическое поле, создаваемое точечным гидродинамическим источником. В этом случае максимальные значения электрического потенциала достигаются при расположении входного патрубка в центре днища резервуара при уровнях жидкости, близких к  $h=R_3$ , независимо от габаритных размеров резервуара, где  $R_3 = \sqrt[3]{\frac{9\pi t}{4\sigma}}$  — радиус полусферы, которая содержит в себе около 80% всего заряда. При этом, если расстояние от входного патрубка до стенок резервуара превышает  $2R_3$ , то величина максимального потенциала также не зависит от соотношения габаритных размеров резервуара; если расстояние от входного патрубка до стенок резервуара равно  $R_3$ , то максимальное значение потенциала снижается примерно на 20%.

После достижения потенциалом максимального значения при уровне  $h=R_3$  дальнейшее повышение уровня жидкости приводит к ослаблению влияния ядра заряда за счет образования слоя практически не заряженной жидкости и к бы-

строму уменьшению потенциала на границе раздела сред. Так, при уровне  $h=3R_3$  его величин уменьшится в 6 раз.

При организации с помощью специальных технологических средств (релаксаторов, насадок на трубопроводы или антистатических колодцев) придонных течений, распределение объемного заряда в которых можно аппроксимировать законом  $\rho=\rho_{0x} \exp\left(-\frac{x}{v_x t}\right)$ , изменение параметров электрического поля имеет тот же характер, что и при точечном гидродинамическом источнике. Однако в отличие от точечного гидродинамического источника у концевого элемента образуется ядро заряда, вытянутое вдоль днища резервуара. С ростом уровня жидкости влияние этого ядра на потенциал границы раздела сред ослабляется слоем практически незаряженной жидкости. Поэтому максимальные величины параметров поля для рассматриваемого случая, которые достигаются на уровне придонного слоя, ниже значений, характерных для точечного гидродинамического источника. Это позволяет считать, что такие технологические средства могут снижать электростатическую опасность, связанную с воспламенением паров нефтепродукта от разрядов статического электричества, в начальный период заполнения без уменьшения скорости потока жидкости.

Полученные уравнения могут быть использованы для расчета специальных технологических средств, в частности, релаксаторов, действенность которых как средства снижения электростатической опасности определяется коэффициентом эффективности  $K_{\text{эфф}}$ , зависящим от формы релаксатора, режима течения жидкости и ее электрофизических свойств. Для постоянной плотности заряда по сечению  $K_{\text{эфф}} = \frac{\rho_{\text{вых}}}{\rho_{\text{вх}}}$ , в противном случае  $K_{\text{эфф}} = \frac{i_{\text{вых}}}{i_{\text{вх}}}$ , т.е. коэффициент эффективности равен отношению конвективных токов на его входе и выходе.

Рассмотрим методику расчета, базирующуюся на достаточно строгом учете электрических и гидродинамических факторов, при следующих положениях:

1) в объеме релаксатора не происходит генерации заряда;

2) процесс является установившимся, т.е.  $\frac{d\rho}{dt}=0$ .

Уравнение (17) примет вид

$$\frac{\rho}{\tau} + \bar{v} \nabla \rho = 0. \quad (24)$$

Для его решения должно быть задано поле скорости  $\bar{v}$ , а также граничные и начальные условия.

Для сравнения рассмотрим интегральную формулу:

$$\frac{Q}{\tau} + \oint \rho \bar{v} ds = 0 \quad (25)$$

(где  $Q$  — полный заряд, сосредоточенный в объеме релаксатора  $\Omega$ ;  $S$  — поверхность, ограничивающая объем  $\Omega$ ), которая дает весьма приблизительную расчетную оценку, так как требует введения довольно грубых допущений: 1) в объеме релаксатора существует такая «средняя» объемная плотность заряда  $\tilde{\rho}$ , что  $Q=\tilde{\rho}\Omega$ ; 2) плотность зарядов по входному и выходному сечению постоянна, т.е.

$$\oint \rho \bar{v} ds = w(\rho_{\text{вых}} - \rho_{\text{вх}}), \quad (26)$$

откуда

$$\frac{Q\tilde{\rho}}{\tau} + w(\rho_{\text{вых}} - \rho_{\text{вх}}) = 0. \quad (27)$$

В этом уравнении неизвестными являются величины  $\tilde{\rho}$  и  $\rho_{\text{вых}}$ . Априори известно, что  $\rho_{\text{вых}} < \tilde{\rho} < \rho_{\text{вх}}$ , поэтому для вычисления  $\rho_{\text{вых}}$  рассматриваются два предельных случая.

Случай 1.  $\tilde{\rho} = \rho_{\text{вх}}$ , тогда

$$\rho_{\text{вых}} = \rho_{\text{вх}} \left(1 - \frac{\Omega}{w\tau}\right) \quad (28)$$

и

$$K_{\text{эфф}} = \frac{\rho_{\text{вых}}}{\rho_{\text{вх}}} = 1 - \frac{\Omega}{w\tau}. \quad (29)$$

Погрешность в определении искомых величин мала только при условии  $\frac{\Omega}{w\tau} \ll 1$ , т.е. в области весьма малой эффективности.

Случай 2.  $\tilde{\rho} = \rho_{\text{вых}}$ , тогда

$$\rho_{\text{вых}} = \rho_{\text{вх}} \frac{1}{1 + \frac{\Omega}{w\tau}} \quad (30)$$

и

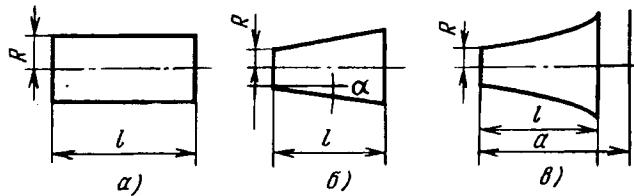
$$R_{\text{эфф}} = \frac{1}{1 + \frac{\Omega}{w\tau}}. \quad (31)$$

Однако и в этом случае погрешность искомых величин невелика лишь при условии  $\frac{\Omega}{w\tau} \ll 1$ . В пределе при  $\frac{\Omega}{w\tau} \gg 1$ ,  $K_{\text{эфф}} \approx \frac{w\tau}{\Omega}$ . Ошибочность обобщения этого выражения на произвольный диапазон изменений  $\frac{\Omega}{w\tau}$  очевидна.

Использование решения дифференциального уравнения (24) позволяет получить непосредственно значение плотности заряда на выходном сечении релаксатора.

В качестве примера могут быть рассмотрены три типа релаксаторов: цилиндрический (рисунок

*a)*, конический (рисунок *б*) и параболический (рисунок *в*), радиус которого изменяется с длиной по закону  $r \sim \sqrt{\frac{1}{l}}$ .



На рисунке обозначены:  $R$  — радиус входного отверстия;  $l$  — линейный размер релаксатора;  $a$  — расстояние от входного отверстия до плоскости растекания;  $\alpha$  — угол наклона конуса по отношению к оси.

Для данных типов релаксаторов получены расчетные соотношения для коэффициентов эффективности:

*a)* для цилиндрического

$$K_{\text{эфф.ц}} = \exp \left( -\frac{\pi R^2 l}{w\tau} \right) = \exp \left( -\frac{\Omega}{w\tau} \right); \quad (32)$$

*b)* для конического

$$K_{\text{эфф.к}} = \exp \left[ \frac{\frac{4\pi}{3} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \left( l^3 + 3l^2 \frac{R}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 3l \frac{R^2}{\sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right)}{3w\tau} \right]; \quad (33)$$

*v)* для параболического

$$K_{\text{эфф.п}} = \left( \frac{a-b}{a} \right) \frac{\pi R^2 a}{w\tau}. \quad (34)$$

Количественное сравнение расчетных данных (см. таблицу), полученных из интегральных соотношений, подтверждает приведенные выше выводы о границах применимости оценок, получаемых из решения интегральных соотношений.

$\frac{\Omega}{w\tau}$	$K_{\text{эфф.1}} = \frac{1}{1 + \frac{\Omega}{w\tau}}$	$L_{\text{эфф.2}} = \frac{w\tau}{\Omega}$	$K_{\text{эфф.ц}} = \exp \left( -\frac{\Omega}{w\tau} \right)$	$\frac{K_{\text{эфф.1}}}{K_{\text{эфф.ц}}}$	$\frac{K_{\text{эфф.2}}}{K_{\text{эфф.ц}}}$
0,1	0,909	10	0,905	1	10
1	0,5	1	0,37	1,4	3
10	0,09	0,1	0,000045	2000	2000

**Выводы.** 1. Разработана обобщенная математическая модель распределения электрических зарядов в резервуарах при их заполнении углеводородными топливами.

2. Полученная математическая модель позволяет выполнить расчет специальных технологических средств снижения уровня электростатической опасности при наливных операциях.

3. На основе указанных расчетов может быть определена эффективность средств электростатической защиты на стадии проектирования систем транспортировки и хранения углеводородных топлив.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gavis J., Kosman J. Development of charge in low-conductivity liquids flowing past surfaces; a theory of the phenomenon in tubes.—J. Coll. Sci., 1961, August, vol. 16. № 2.
2. Гогосов В.В. и др. Магнитная гидродинамика. 1979.
3. Власов А.Д., Мурин Б.П. Единицы физических величин в науке и технике: Справочник.— М.: Энергоиздат, 1990.
4. Стреттон Дж.А. Теория электромагнетизма.— М.: Гостехиздат, 1948.
5. Веников В.А. Теория подобия и моделирования: Учебное пособие для вузов.— М.: Высшая школа, 1976.
6. Максимов Б.К., Обух А.А. Статическое электричество в промышленности и защита от него.— М.: Энергия, 1978.
7. Иоссель Ю.Я. Электрические поля постоянных токов.— Л.: Энергоиздат, 1986.
8. Максимов Б.К. и др. Электростатическая безопасность при заполнении резервуаров нефтепродуктами.— М.: Энергоиздат, 1989.

{09.12.93}

**Авторы:** Галка Виктор Леонидович окончил радиотехнический факультет Харьковского авиационного института в 1969 г. В 1991 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование». Главный инженер Центрального научно-исследовательского института судовой электротехники и технологии (ЦНИИ СЭТ).

Щигловский Константин Борисович окончил приборостроительный факультет Ленинградского кораблестроительного института в 1959 г. Заведующий лабораторией электростатической и грозозащиты судов ЦНИИ СЭТ.

# Матрично-топологические методы в задачах анализа процессов в электрических RLC-цепях

АРТЫМ А.Д., ФИЛИН В.А.

Дано обобщение матричных узловых уравнений на цепи, содержащие идеализированные источники напряжения. На этой основе находятся необходимые для решения уравнений состояния матричные уравнения для RLC-цепи, приведенной к резистивной путем замены элементов L и C идеализированными источниками тока и напряжения. В результате решения этих уравнений определяются коэффициенты матричного дифференциального уравнения состояния. Полученные решения служат матричными алгоритмами для программирования и численных расчетов на ЭВМ. Метод иллюстрируется примером.

The generalization of a matrix node equations on the circuits containing idealized voltage sources is given. RLC-circuit is transformed to resistive one by replacing L and C elements with current and voltage sources. On this basis the matrix equations of RLC-circuits demanded for the solution of state variable equations are determined. As a result of solving these equations the coefficients of matrix differential state variable equation are achieved. The determined solutions serve as matrix algorithms for programming and computer aided calculations. One example is shown to demonstrate this technique.

**Состояние вопроса и цель работы.** Непрерывное повышение мощности и сложности современных электротехнических устройств, а также рост требований к их устойчивости и надежности работы обусловливают необходимость совершенствования методов анализа процессов в электрических цепях этих устройств. Методы формирования уравнений состояния, являющиеся основой моделирования на ЭВМ процессов в сложных цепях, описаны в фундаментальных трудах [1–4] и получили развитие в многочисленных работах других авторов. Эти методы, являющиеся универсальными по отношению к типам цепей и видам содержащихся в них элементов, основаны на расчете и математических преобразованиях гибридной матрицы резистивной части схемы или на разделении схемы на многополюсные подсхемы и фактически не используют матрично-топологический аппарат узлового анализа.

В работах по машинному анализу это объясняется непригодностью метода узловых напряжений для формализованной записи и решения уравнений цепей с элементами, имеющими нулевое сопротивление. К таким элементам относятся задающие источники напряжения ( $u_0$ -ветви), а при анализе переходных процессов — эквивалентные источники напряжения, замещающие емкости ( $C$ -ветви). Таким образом, наиболее популярный для линейных  $R$ -цепей в силу простоты и наглядности используемой топологической А-матрицы инциденции метод не нашел практического применения при формализации операций расчета на ЭВМ процессов в сложных цепях с реактивными элементами.

В [5] сформулированы правила и дана ме-

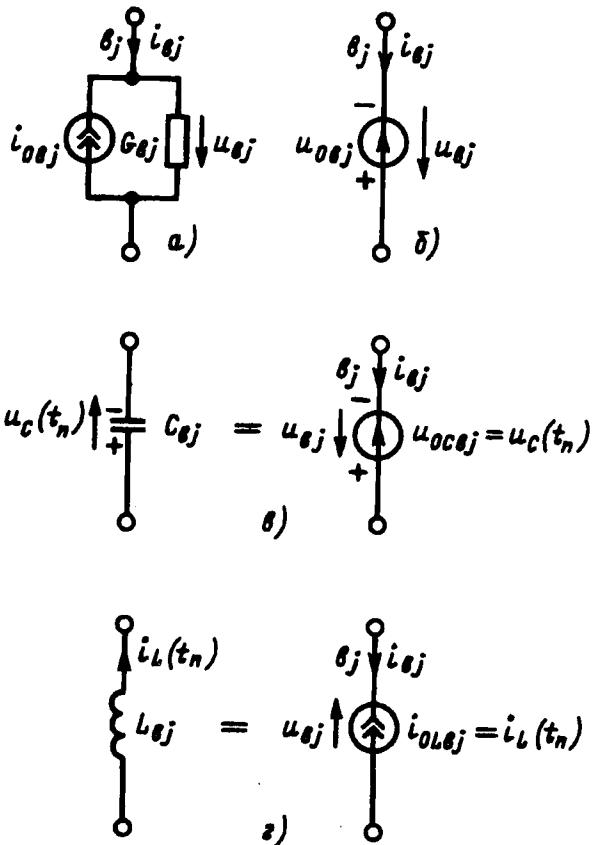
тодика применения метода узловых напряжений для матрично-топологического анализа сложных резистивных цепей, содержащих  $u_0$ -ветви. На основе метода получены решения матричных уравнений, представляющие по сути эффективные алгоритмы для ЭВМ. В этой связи представляется перспективным развитие результатов [5] для задач анализа динамических процессов в цепях с реактивными элементами.

Таким образом, цель данной работы — — приспособить метод узловых напряжений для формализованного расчета матричных коэффициентов уравнения состояния RLC-цепей, сохранив при этом преимущества метода, как и для  $R$ -цепей. Для этого в работе обобщаются понятия векторов электрических величин и топологической А-матрицы, что позволяет получить аналитические матричные решения уравнений RLC-цепи, приведенной к резистивной, и рассчитать матричные коэффициенты уравнения состояния.

**Связь уравнений состояния с уравнениями цепи, приведенной к резистивной.** В общем случае для цепи, содержащей  $N_C$  емкостей и  $N_L$  индуктивностей с независимыми начальными условиями, необходимо составить две системы дифференциальных уравнений. В матричной форме для ветвей  $v_j$ , состоящих из емкостей  $C_{Bj}$  с напряжениями  $u_{0C_{Bj}}$  и токами  $i_{Bj}$  ( $j=1, 2, \dots, N_C$ ), дифференциальное уравнение имеет вид

$$d u_{0C_B}(t) / dt = - || C_B^{-1} || \cdot i_B^{(C)}(t). \quad (1)$$

Аналогично для ветвей  $v_j$ , состоящих из индуктивностей  $L_{Bj}$  (рис. 1,2) с токами  $i_{0L_{Bj}}$  и напряжениями  $u_{Bj}$  ( $j=1, 2, \dots, N_L$ ), имеем



Типы ветвей, используемых для приведения RLC-цепи к резистивной: а —  $G_{0ej}$ -ветвь, б —  $i_{0ej}$ -ветвь, в —  $C$ -ветвь (источник напряжения), г —  $L$ -ветвь (источник тока)

$$di_{0LB}(t)/dt = - ||L_B^{-1}|| \cdot u_B^{(L)}(t), \quad (2)$$

где  $C_B^{-1}$  и  $L_B^{-1}$  — диагональные матрицы обратных емкостей и индуктивностей.

Для любого момента времени  $t$  в результате решения уравнений цепи, приведенной к резистивной путем замен емкостей источниками напряжений  $u_{0CBj}$  (рис. 1,в), а индуктивностей — источниками токов  $i_{0LBj}$  (рис. 1,г), можно выразить  $i_B^{(C)}(t)$  в (1) и  $u_B^{(L)}(t)$  в (2) через переменные состояния  $i_{0LB}(t)$  и  $u_{0CB}(t)$ , задающие токи  $i_{0i_0B}(t)$ , напряжения  $u_{0u_0B}(t)$  и параметры цепи. В силу линейности цепи и справедливости принципа наложения получающиеся решения уравнений цепи, приведенной к резистивной, линейно зависят от переменных состояния и задающих величин:

$$\left. \begin{aligned} i_B^{(C)}(t) &= H_{CC} \cdot u_{0CB}(t) + H_{CL} \cdot i_{0LB}(t) + \\ &+ H_{Cu_0} \cdot u_{0u_0B}(t) + H_{Ci_0} \cdot i_{0i_0B}(t); \\ u_B^{(L)}(t) &= H_{LC} \cdot u_{0CB}(t) + H_{LL} \cdot i_{0LB}(t) + \\ &+ H_{Lu_0} \cdot u_{0u_0B}(t) + H_{Li_0} \cdot i_{0i_0B}(t), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

что может быть записано также в виде

$$\left. \begin{aligned} i_B^{(C)}(t) &= ||H_{CL} : H_{Ci_0}|| \cdot \begin{vmatrix} i_{0LB}(t) \\ \dots \\ i_{0i_0B}(t) \end{vmatrix} + \\ &+ ||H_{CL} : H_{Ci_0}|| \cdot \begin{vmatrix} i_{0LB}(t) \\ \dots \\ i_{0i_0B}(t) \end{vmatrix}; \\ u_B^{(L)}(t) &= ||H_{LL} : H_{Li_0}|| \cdot \begin{vmatrix} i_{0LB}(t) \\ \dots \\ i_{0i_0B}(t) \end{vmatrix} + \\ &+ ||H_{CL} : H_{Ci_0}|| \cdot \begin{vmatrix} i_{0LB}(t) \\ \dots \\ i_{0i_0B}(t) \end{vmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (3a)$$

**Обобщенные матричные уравнения.** При группировании слагаемых и объединении уравнений (3) имеем

$$w(t) = H_{00}^{(CL)} \cdot v_{CL}(t) + H_{00}^{(u_0i_0)} \cdot v_{u_0i_0}(t) = H \cdot v(t), \quad (4)$$

где

$$w(t) = \begin{vmatrix} i_B^{(C)}(t) \\ \dots \\ u_B^{(L)}(t) \end{vmatrix}; \quad v_{CL}(t) = \begin{vmatrix} u_{0CB}(t) \\ \dots \\ i_{0LB}(t) \end{vmatrix}; \quad v_{u_0i_0}(t) = \begin{vmatrix} u_{0u_0B}(t) \\ \dots \\ i_{0i_0B}(t) \end{vmatrix};$$

$$H_{00}^{(CL)} = \begin{vmatrix} H_{CC} & H_{CL} \\ \dots & \dots \\ H_{LC} & H_{LL} \end{vmatrix}; \quad H_{00}^{(u_0i_0)} = \begin{vmatrix} H_{Cu_0} & H_{Ci_0} \\ \dots & \dots \\ H_{Lu_0} & H_{Li_0} \end{vmatrix};$$

$$\begin{aligned} H &= ||H_{00}^{(CL)} : H_{00}^{(u_0i_0)}||; \\ v(t) &= ||v_{CL}(t) : v_{u_0i_0}(t)||^T = \\ &= ||u_{0CB}(t) : i_{0LB}(t) : u_{0u_0B}(t) : i_{0i_0B}(t)||^T \quad (5) \end{aligned}$$

— соответственно матрицы-столбцы токов емкостей и напряжений индуктивностей, переменных состояния, задающих величин; матричные  $H$ -коэффициенты передачи цепи, приведенной к резистивной, и матрица-столбец эквивалентных и истинных источников.

Объединение (1) и (2) с учетом (4), (5) дает

$$\begin{aligned} dv_{CL}(t)/dt &= - \begin{vmatrix} C_B^{-1} & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & L_B^{-1} \end{vmatrix} \cdot w(t) = \\ &= - \begin{vmatrix} C_B^{-1} & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & L_B^{-1} \end{vmatrix} \cdot H \cdot v(t) = D \cdot v(t); \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D &= - \begin{vmatrix} C_B^{-1} & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & L_B^{-1} \end{vmatrix} \cdot H = - \begin{vmatrix} C_B^{-1} & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & L_B^{-1} \end{vmatrix} \cdot \\ &\cdot \begin{vmatrix} H_{CC} & H_{CL} & H_{Cu_0} & H_{Ci_0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{LC} & H_{LL} & H_{Lu_0} & H_{Li_0} \end{vmatrix} = ||D_{CL} : D_{u_0i_0}||; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{CL} &= - \left| \begin{array}{c|c} \mathbf{C}_B^{-1} & \mathbf{0} \\ \hline \cdots & \cdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_B^{-1} \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{c|c} \mathbf{H}_{CC} & \mathbf{H}_{CL} \\ \hline \cdots & \cdots \\ \mathbf{H}_{LC} & \mathbf{H}_{LL} \end{array} \right| = \\ &= - \left| \begin{array}{c|c} \mathbf{C}_B^{-1} & \mathbf{0} \\ \hline \cdots & \cdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_B^{-1} \end{array} \right| \cdot \mathbf{H}_{00}^{(CL)}, \\ \mathbf{D}_{u_0 i_0} &= - \left| \begin{array}{c|c} \mathbf{C}_B^{-1} & \mathbf{0} \\ \hline \cdots & \cdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_B^{-1} \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{c|c} \mathbf{H}_{Cu_0} & \mathbf{H}_{Ci_0} \\ \hline \cdots & \cdots \\ \mathbf{H}_{Lu_0} & \mathbf{H}_{Li_0} \end{array} \right| = \\ &= - \left| \begin{array}{c|c} \mathbf{C}_B^{-1} & \mathbf{0} \\ \hline \cdots & \cdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_B^{-1} \end{array} \right| \cdot \mathbf{H}_{00}^{(u_0 i_0)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Оба матричных уравнения состояния (4), (6) выражаются через матрицу  $\mathbf{H}$ , называемую общей. Совокупность матричных уравнений (4) для цепи, приведенной к резистивной, и дифференциального (6) представляет собой полную систему уравнений состояния цепи.

Поскольку цепь, приведенная к резистивной, по виду ничем принципиально не отличается от резистивной, то могут быть использованы все методы, описанные в [5], в частности рассматриваемый в данной работе метод узловых напряжений. Специфической особенностью является необходимость выделять в отдельные группы решения для токов емкостей и напряжений индуктивностей, входящих в матрицу (5), а также вычислять матричный коэффициент передачи  $\mathbf{H}$  в (4), поскольку он входит в дифференциальное уравнение (6), подлежащее решению. Выделение в отдельные группы емкостных и индуктивных ветвей приводит к необходимости введения специальных правил нумерации ветвей и электрических величин.

**Векторы-матрицы электрических величин.** Если два узла приведенной резистивной цепи связаны друг с другом одной или несколькими, соединенными последовательно  $C$ - или  $u_0$ -ветвями, то узловое напряжение одного из них (дополнительного) легко выражается через узловое напряжение другого (независимого) и (или) напряжение соответствующей  $C$ - или  $u_0$ -ветви. При наличии  $N_C + N_{u_0} = N_{\text{д.у}}$  таких  $C$ - и  $u_0$ -ветвей число независимых узлов (НУ) уменьшается с  $N_y - 1$  до  $N_{\text{Н.у}} = N_y - 1 - N_{\text{д.у}}$ . При составлении нормальной схемы цепи, приведенной к резистивной, НУ присваиваются начальные (от 1 до  $N_{\text{Н.у}}$ ), а оставшимся дополнительным узлам (ДУ)  $N_{\text{д.у}}$  — последующие номера (от  $N_{\text{Н.у}} + 1$  до  $N_y - 1 = N_{\text{Н.у}} + N_{\text{д.у}}$ ). Соответственно  $L$ - и  $G_{i_0}$ -ветвям присваиваются начальные (от 1 до  $N_L + N_{G_{i_0}}$ ), а оставшимся  $C$ - и  $u_0$ -ветвям — последующие но-

мера (от  $N_L + N_{G_{i_0}} + 1$  до  $N_B = N_L + N_{G_{i_0}} + N_C + N_{u_0}$ ). Если параллельно индуктивностям  $L_{Bj}$ , т.е. источникам  $i_{0L_{Bj}}$  включены проводимости  $G_{Bj}$ , то их соединения, подобно  $G_{i_0}$ -ветвям (рис. 1, а) могут рассматриваться как обобщенные  $G_{i_0L}$ -ветви. Вектор-матрица  $\mathbf{i}_{0B}$  задающих токов принимает вид

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{0B} &= \left| \begin{array}{c} i_{0L_B1}, \dots, i_{0L_B, N_i}; i_{0i_0B, N_i+1}, \dots, i_{0i_0B, N_L + N_{G_{i_0}}} \end{array} \right|^T = \\ &= \left| \begin{array}{c} \mathbf{i}_{0L_B} \mathbf{i}_{0i_0B} \end{array} \right|^T, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{i}_{0L_B} = \left| \begin{array}{c} i_{0L_B1}, \dots, i_{0L_B, N_i} \end{array} \right|^T$ ,  $\mathbf{i}_{0i_0B} = \left| \begin{array}{c} i_{0i_0B, N_i+1}, \dots, i_{0i_0B, N_L + N_{G_{i_0}}} \end{array} \right|^T$  — матрицы-векторы соответственно задающих токов, отображающих начальные условия индуктивностей ( $i_{0L}$ -ветвей) и истинных задающих токов ( $i_{0i_0}$ -ветвей).

Матрица  $\mathbf{u}_B^{(LG_{i_0})}$  напряжений  $G_{i_0}$ -ветвей с учетом  $L$ -ветвей приобретает вид

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_B^{(LG_{i_0})} &= \left| \begin{array}{c} u_{B1}, \dots, u_{B, N_L}; u_{B, N_L+1}, \dots, u_{B, N_L+N_{G_{i_0}}} \end{array} \right|^T = \\ &= \left| \begin{array}{c} \mathbf{u}_B^{(L)} \mathbf{u}_B^{(G_{i_0})} \end{array} \right|^T, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{u}_B^{(L)} = \left| \begin{array}{c} u_{B1}, \dots, u_{B, N_L} \end{array} \right|^T$ ,  $\mathbf{u}_B^{(G_{i_0})} = \left| \begin{array}{c} u_{B, N_L+1}, \dots, u_{B, N_L+N_{G_{i_0}}} \end{array} \right|^T$  — матрицы-векторы соответственно  $L$ - и  $G_{i_0}$ -ветвей.

Аналогично для токов этих же ветвей

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_B^{(LG_{i_0})} &= \left| \begin{array}{c} i_{B1}, \dots, i_{B, N_L}; i_{B, N_L+1}, \dots, i_{B, N_L+N_{G_{i_0}}} \end{array} \right|^T = \\ &= \left| \begin{array}{c} \mathbf{i}_B^{(L)} \mathbf{i}_B^{(G_{i_0})} \end{array} \right|^T, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{i}_B^{(L)} = \left| \begin{array}{c} i_{B1}, \dots, i_{B, N_L} \end{array} \right|^T$ ,  $\mathbf{i}_B^{(G_{i_0})} = \left| \begin{array}{c} i_{B, N_L+1}, \dots, i_{B, N_L+N_{G_{i_0}}} \end{array} \right|^T$  — матрицы-векторы соответственно токов  $L$ - и  $G_{i_0}$ -ветвей.

Подобно этому, помимо  $N_{u_0}$  ветвей истинных источников напряжения ( $u_0$ -ветвей), появляются  $N_C$  ветви, полученные в результате замены емкостей  $C_{Bj}$  источниками напряжений  $u_{0C_{Bj}}$ . Вектор-матрица задающих напряжений с учетом начальных условий емкостей ( $u_{0C_{Bj}}$ ) принимает вид

$$\mathbf{u}_{0B} = \left| \begin{array}{c} u_{0C_B, N_L+N_{G_{i_0}}+1}, \dots, u_{0C_B, N_L+N_{G_{i_0}}+N_C} \end{array} \right|^T,$$

$$u_{0u_0B, N_L+N_{G_{i_0}}+N_C+1}, \dots, u_{0u_0B, N_B} \right|^T = \left| \begin{array}{c} \mathbf{u}_{0C_B} \mathbf{u}_{0u_0B} \end{array} \right|^T,$$

где  $\mathbf{u}_{0C_B} = \left| \begin{array}{c} u_{0C_B, N_L+N_{G_{i_0}}+1}, \dots, u_{0C_B, N_L+N_{G_{i_0}}+N_C} \end{array} \right|^T$ ,  $\mathbf{u}_{0u_0B} = \left| \begin{array}{c} u_{0u_0B, N_L+N_{G_{i_0}}+N_C+1}, \dots, u_{0u_0B, N_B} \end{array} \right|^T$  — матрицы соответственно истинных задающих напряжений ( $u_0$ -ветвей) и задающих напряжений ( $u_{0C}$ -

ветвей), отображающих начальные условия на емкостях.

Аналогично для токов этих же ветвей

$$\mathbf{i}_B^{(Cu_0)} = | | i_{B,N_L+N_{Gi_0}+1}, \dots, i_{B,N_L+N_{Gi_0}+N_C} | |^T;$$

$$i_{B,N_L+N_{Gi_0}+N_C+1}, \dots, i_{B,N_B} | |^T = | | \mathbf{i}_B^{(C)} : \mathbf{i}_B^{(u_0)} | |^T,$$

где  $\mathbf{i}_B^{(C)} = | | i_{B,N_L+N_{Gi_0}+1}, \dots, i_{B,N_L+N_{Gi_0}+N_C} | |^T$ ,  $\mathbf{i}_B^{(u_0)} = | | i_{B,N_L+N_{Gi_0}+N_C+1}, \dots, i_{B,N_B} | |^T$  — матрицы соответственно токов  $C$ - и  $u_0$ -ветвей.

**Обобщенная топологическая матрица узлов и матричные решения уравнений цепи, приведенной к резистивной.** В соответствии с принятым выше разделением узлов и ветвей на группы А-матрица узлов разбивается на подматрицы (блоки) и принимает вид

$$\mathbf{A} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{НУ} & \begin{array}{c} GL\text{-ветви} \\ GL\text{-ветви} \\ \vdots \\ GL\text{-ветви} \end{array} & \begin{array}{c} Gi_0\text{-ветви} \\ C\text{-ветви} \\ \vdots \\ Cu_0\text{-ветви} \end{array} & \begin{array}{c} u_0\text{-ветви} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \\ \hline \text{ДУ} & \begin{array}{c} A_{H LGi_0} \\ \vdots \\ A_{D LGi_0} \\ \vdots \\ A_{H Cu_0} \end{array} & \begin{array}{c} A_{D Cu_0} \\ \vdots \\ A_{D Cu_0} \end{array} & \begin{array}{c} \mathbf{i}_B^{(LGi_0)} \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \\ \hline \end{array}$$

С учетом такого разделения узлов и ветвей на группы и А-матрицы на блоки уравнение по закону токов Кирхгофа будет иметь вид

$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{НУ} & \begin{array}{c} GL\text{-ветви} \\ GL\text{-ветви} \\ \vdots \\ GL\text{-ветви} \end{array} & \begin{array}{c} Gi_0\text{-ветви} \\ C\text{-ветви} \\ \vdots \\ Cu_0\text{-ветви} \end{array} & \begin{array}{c} u_0\text{-ветви} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \\ \hline \text{ДУ} & \begin{array}{c} A_{H LGi_0} \\ \vdots \\ A_{D LGi_0} \\ \vdots \\ A_{D Cu_0} \end{array} & \begin{array}{c} A_{H Cu_0} \\ \vdots \\ A_{D Cu_0} \end{array} & \begin{array}{c} \mathbf{i}_B^{(LGi_0)} \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \\ \hline \end{array} = 0. (8)$$

Связь напряжений ветвей с узловыми напряжениями осуществляется по закону напряжений Кирхгофа

$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \mathbf{u}_B^{(LGi_0)} & \begin{array}{c} LGi_0\text{-ветви} \\ \vdots \\ Cu_0\text{-ветви} \end{array} & \begin{array}{c} \text{НУ} \\ \vdots \\ Cu_0\text{-ветви} \end{array} & \begin{array}{c} \mathbf{u}_{H.y} \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{D.y} \end{array} \\ \hline -\mathbf{i}_{0B} & \begin{array}{c} \mathbf{A}_{H LGi_0}^T \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{H Cu_0}^T \end{array} & \begin{array}{c} \mathbf{A}_{D LGi_0}^T \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{D Cu_0}^T \end{array} & \begin{array}{c} \mathbf{u}_{H.y} \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{D.y} \end{array} \\ \hline \end{array} = 0. (9)$$

где

$\mathbf{u}_{H.y} = | | u_{y_1}, \dots, u_{y_{N_H}} | |^T$ ,  $\mathbf{u}_{D.y} = | | u_{y_{N_H+1}}, \dots, u_{y_{N_H-1}} | |^T$  — матрицы напряжений НУ и ДУ (зависимых) узлов, входящих в матрицу узловых напряжений;  $\mathbf{i}_{0B} = | | i_{0B, N_i + N_{Gi_0} + 1}, \dots, i_{0B, N_B} | |^T = \mathbf{i}_B^{(Cu_0)}$  — матрица задающих напряжений  $Cu_0$ -ветвей.

Число дополнительных узлов  $N_{d.y}$  равно числу  $Cu_0$ -ветвей ( $N_C + N_{u_0}$ ). При этом каждый ДУ касается, по крайней мере, одной из  $Cu_0$ -ветвей, а каждая из  $Cu_0$ -ветвей образует новый ДУ. Поэтому подматрица  $A_{dCu_0}$  является квадратной и не имеет нулевых строк или столбцов, т.е. в общем случае ее определитель не равен нулю и существует обратная матрица  $A_{dCu_0}^{-1}$ . Это позволяет решить матричное уравнение (8) относительно  $\mathbf{i}_B^{(Cu_0)}$ :

$$\mathbf{i}_B^{(Cu_0)} = -A_{dCu_0}^{-1} \cdot A_{dLGi_0} \cdot \mathbf{i}_B^{(LGi_0)}. \quad (10)$$

Подстановка этого значения в (8) позволяет получить уравнение, в котором токи  $Cu_0$ -ветвей выражены через токи  $LGi_0$ -ветвей (т.е. исключены):

$$\begin{aligned} A_{H.y} \cdot \mathbf{i}_B^{(LGi_0)} &= 0, \\ A_{H.y} = A_{H LGi_0} - A_{H Cu_0} \cdot A_{dCu_0}^{-1} \cdot A_{dLGi_0} & \quad (11a,b) \end{aligned}$$

Таким образом, независимыми являются лишь токи  $\mathbf{i}_B^{(LGi_0)}$  всех  $LGi_0$ -ветвей, поскольку токи  $\mathbf{i}_B^{(Cu_0)}$  всех  $Cu_0$ -ветвей могут быть найдены по  $\mathbf{i}_B^{(LGi_0)}$  с помощью (10).

Токи  $LGi_0$ -ветвей связаны с напряжениями этих ветвей и задающими токами уравнением

$$\mathbf{i}_B^{(LGi_0)} = \mathbf{G}_B \cdot \mathbf{u}_B^{(LGi_0)} - \mathbf{i}_{0B}. \quad (12)$$

Подстановка в это уравнение значения  $\mathbf{u}_B^{(LGi_0)}$  из (9) дает

$$\mathbf{i}_B^{(LGi_0)} = \mathbf{G}_B (\mathbf{A}_{H LGi_0}^T \cdot \mathbf{u}_{H.y} + \mathbf{A}_{D LGi_0}^T \cdot \mathbf{u}_{D.y}) - \mathbf{i}_{0B}, \quad (13)$$

где  $\mathbf{G}_B$  и  $\mathbf{i}_{0B}$  — соответственно матрицы проводимостей и задающих токов  $LGi_0$ -ветвей;

$$\mathbf{G}_B = \begin{vmatrix} G_{B1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G_{B2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & G_{B,N_{LGi_0}} \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{i}_{0B} = | | i_{0B, 1}, \dots, i_{0B, N_L + N_{Gi_0}} | |^T.$$

Матрица  $(A_{dCu_0}^T)^{-1}$  существует по тем же причинам, что и  $A_{dCu_0}^{-1}$ , фигурирующая в (10), поэтому можно решить уравнение (9) относительно  $\mathbf{u}_{d.y}$ :

$$\mathbf{u}_{\text{д.у}} = \left( \mathbf{A}_{\text{д}C\mathbf{u}_0}^T \right)^{-1} \cdot \left( -\mathbf{A}_{\text{н}C\mathbf{u}_0}^T \cdot \mathbf{u}_{\text{н.у}} - \mathbf{u}_{0\text{в}} \right). \quad (14)$$

Подстановка этого значения  $\mathbf{u}_{\text{д.у}}$  в (13) дает с учетом (11б)

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_B^{(LGi_0)} &= \mathbf{G}_B \cdot (\mathbf{A}_{\text{н}LGi_0}^T - \mathbf{A}_{\text{д}LGi_0}^T \cdot (\mathbf{A}_{\text{д}C\mathbf{u}_0}^T)^{-1} \cdot \mathbf{A}_{\text{н}C\mathbf{u}_0}^T) \cdot \mathbf{u}_{\text{н.у}} - \\ &- \mathbf{G}_B \cdot \mathbf{A}_{\text{д}LGi_0}^T \cdot (\mathbf{A}_{\text{д}LGi_0}^T)^{-1} \cdot \mathbf{u}_{0\text{в}} - \mathbf{i}_{0\text{в}} = \mathbf{G}_B \cdot \mathbf{A}_{\text{н.у}}^T \mathbf{u}_{\text{н.у}} - \\ &- \mathbf{G}_B \cdot \mathbf{A}_{\text{д}LGi_0}^T \cdot (\mathbf{A}_{\text{д}C\mathbf{u}_0}^T)^{-1} \cdot \mathbf{u}_{0\text{в}} - \mathbf{i}_{0\text{в}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Уравнение для напряжений  $\mathbf{u}_{\text{н.у}}$  НУ получается после подстановки  $\mathbf{i}_B^{(LGi_0)}$  в (11а):

$$\mathbf{G}_{\text{н.у}} \cdot \mathbf{u}_{\text{н.у}} = \mathbf{i}_{0\text{н.у}}, \quad \mathbf{u}_{\text{н.у}} = \mathbf{G}_{\text{н.у}}^{-1} \cdot \mathbf{i}_{0\text{н.у}}, \quad (16\text{а},\text{б})$$

где

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{G}_{\text{н.у}} &= \mathbf{A}_{\text{н.у}} \cdot \mathbf{G}_B \cdot \mathbf{A}_{\text{н.у}}^T, \quad \mathbf{i}_{0\text{н.у}} = \mathbf{A}_{\text{н.у}} (\mathbf{i}_{0\text{в}} + \mathbf{G}_{0\text{в}} \cdot \mathbf{u}_{0\text{в}}), \\ \mathbf{G}_{0\text{в}} &= \mathbf{G}_B \cdot \mathbf{A}_{\text{д}LGi_0}^T \cdot (\mathbf{A}_{\text{д}C\mathbf{u}_0}^T)^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (17\text{а}-\text{в})$$

**Расчет матричных Н-коэффициентов.** Матричные передаточные Н-коэффициенты, определяющие общую матрицу Н (5), входящую в уравнения состояния (4), (6), могут быть найдены из общих уравнений цепи, приведенной к резистивной. Последовательная подстановка  $\mathbf{i}_{0\text{н.у}}$  из (17б) в уравнение (16б) для  $\mathbf{u}_{\text{н.у}}$ , затем  $\mathbf{u}_{\text{н.у}}$  — в (14) для  $\mathbf{u}_{\text{д.у}}$ , после чего  $\mathbf{u}_{\text{н.у}}$  и  $\mathbf{u}_{\text{д.у}}$  — в уравнение (9) для  $\mathbf{u}_B^{(LGi_0)}$  и  $\mathbf{i}_B^{(LGi_0)}$  — в (10) дает

$$\mathbf{i}_B^{(Cu_0)} = \mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{i}_{0\text{в}} + \mathbf{H}_2 \cdot \mathbf{u}_{0\text{в}}.$$

Последовательная подстановка  $\mathbf{i}_{0\text{н.у}}$  (17б) в уравнение (16б) для  $\mathbf{u}_{\text{н.у}}$ , затем  $\mathbf{u}_{\text{н.у}}$  в уравнение (14) для  $\mathbf{u}_{\text{д.у}}$  и этих матриц в (9) дает

$$\mathbf{u}_B^{(LGi_0)} = \mathbf{H}_3 \cdot \mathbf{i}_{0\text{в}} + \mathbf{H}_4 \cdot \mathbf{u}_{0\text{в}}.$$

Путем выделения из найденных матриц  $\mathbf{H}_1$ ,  $\mathbf{H}_2$ ,  $\mathbf{H}_3$  и  $\mathbf{H}_4$  блоков  $\mathbf{H}_{CL}$ ,  $\mathbf{H}_{Ci_0}$ ,  $\mathbf{H}_{CC}$ ,  $\mathbf{H}_{Cu_0}$ ,  $\mathbf{H}_{LL}$ ,  $\mathbf{H}_{Li_0}$ ,  $\mathbf{H}_{LC}$ ,  $\mathbf{H}_{Lu_0}$  формируются матрицы

$\mathbf{H}_{00}^{(CL)}$  и  $\mathbf{H}_{00}^{(u_{0i_0})}$ , с помощью которых и матрицы  $\mathbf{C}_B^{-1}$ ,  $\mathbf{L}_B^{-1}$  вычисляются матричные коэффициенты  $\mathbf{D}_{CL}$  и  $\mathbf{D}_{u_{0i_0}}$  уравнения состояния.

Необходимо отметить, что при полном расчете переходных процессов электрические величины — матрицы токов  $\mathbf{i}_B^{(LGi_0)}$ ,  $\mathbf{i}_B^{(Cu_0)}$ , напряжений  $\mathbf{u}_B^{(LGi_0)}$  обобщенных ветвей (исключая переменные состояния  $\mathbf{i}_{0LB}$ ,  $\mathbf{u}_{0CB}$ ), находятся для любого момента времени  $t$  по (15), (10), (9) как решения уравнений цепи, приведенной к резистивной. Токи G-ветвей определяются из (15), где правая часть вычисляется без слагаемого  $-\mathbf{i}_{0\text{в}}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калахан Д. Методы машинного расчета электронных схем.— М.: «Мир», 1970.
2. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем.— М.: Советское радио, 1976.
3. Чуя Л., Пен Мин Лин. Машинный анализ электронных схем.— М.: Энергия, 1980.
4. Синтез линейных электрических и электронных цепей (метод переменных состояния) / П.А. Ионкин, Н.Г. Максимович, В.Г. Миронов и др.— Львов: Вища школа, 1982.
5. Артым А.Д., Бахмутский А.Е. Матрично-топологические методы анализа электрических цепей с применением ЭВМ 0701, 0702, 0703, 0708. Учебное пособие.— Л.: ЛЭИС, 1987.

[28.12.93]

*Авторы: Артым Анатолий Дмитриевич окончил электрофизический факультет Ленинградского политехнического института в 1950 г. В 1962 г. защитил докторскую диссертацию по вопросам теории и методов частотной модуляции. Профессор кафедры теории электрических цепей (ТЭЦ) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникации (СПбГУТ, бывший Ленинградский электротехнический институт связи).*

*Филин Владимир Алексеевич окончил факультет многоканальной электросвязи Ташкентского института связи в 1975 г. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию по вопросам оптимизации цепи обратной связи в мощных ключевых устройствах. Докторант кафедры ТЭЦ СПбГУТ.*

# Дискуссии

## **Выбор типа воздушной линии электропередачи по комплексному критерию**

(статья Э.Н. Зуева, Электричество, 1991, № 11)

**СВИДЕРСКАЯ О.В., СВИДЕРСКИЙ В.Ф.**

В нынешней сложной экономической и экологической обстановке в странах СНГ наибольший интерес представляет экологический критерий, учитывающий охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов (земли, водного и воздушного бассейна, животного и растительного мира, полезных ископаемых и др.). Этот критерий пока что не стал одним из главных критериев при оценке вариантов и выборе технических решений, как это неоднократно предлагалось в нашей экономической и технической литературе в связи с обострением экологических проблем.

В частности, при проектировании воздушных линий (ВЛ) экологические аспекты учитываются в той мере, в какой это необходимо для обеспечения сохранности ВЛ, нормальных условий их эксплуатации и предотвращения несчастных случаев. Полный же учет ущерба в настоящее время не производится. Таким образом, окружающей среде наносится значительный ущерб, который не учитывается при известных методах оптимального проектирования, при сравнении вариантов развития электропередач и выборе природоохранных мероприятий. Полные проектные затраты для таких электропередач значительно ниже, чем фактические затраты. В результате снижается роль и достоверность технико-экономических расчетов при планировании и проектировании.

Избежать воздействия ВЛ на окружающую среду в полной мере практически невозможно, поэтому особо актуально умение определять характер и масштабы этих воздействий, их продолжительность и интенсивность, оценивать негативные последствия и принимать меры по сведению их к минимуму. На данном этапе важно выявить и оценить экологические последствия воздействий ВЛ на лесное и сельское хозяйство страны, где оценку можно производить по изменению продуктивности угодий и качества продукции, а также их средозащитных и социальных

функций. Изменение и расширение форм собственности в лесном и сельском хозяйстве потребуют пересмотра всего механизма управления в отраслях лесо- и землепользования. Главный элемент этого механизма — адекватная экономическая оценка леса и земли, как основа исчисления ставок платежей за пользование лесными и земельными ресурсами с учетом их разнообразных экологических, социальных и экономических полезностей. Переход к рыночной экономике, изменение форм собственности на производственные фонды и на природные ресурсы и установление на них объективных цен позволит более основательно подойти к вопросу обоснования типов ВЛ (класса напряжения, числа цепей, трассы и пр.) и выбора природных мероприятий.

Воздействие ВЛ на компоненты окружающей среды (кроме эстетических) проявляется в полосе отчуждения, и их полновесная оценка невозможна без учета ширины полосы отчуждения. Поэтому с учетом изложенных условий предложенный в обсуждаемой статье учет ширины полосы отчуждения при выборе типа ВЛ представляется вполне оправданным. Вместе с тем, учет одной ширины полосы отчуждения был бы приемлемым при однообразной трассе ВЛ (пустыня, сплошной лес, тундра, степень), что в практике проектирования встречается крайне редко.

В реальных условиях при прокладке трассы проектируемой ВЛ в различных природно-климатических условиях, отличающихся ландшафтом, геологией, геокриологией, гидрологией, освоенностью, чувствительностью биогеоценоза к антропогенным и техногенным воздействиям, сама по себе ширина полосы отчуждения не характеризует ни экологическую ситуацию, ни экологический ущерб, наносимый ВЛ по пути ее следования. Ширина полосы отчуждения зависит от типа ВЛ, класса напряжения, числа цепей, конструктивной схемы опоры, а ее стоимость, кроме того, от условий прохождения трассы (пашня, луг, лес, пустыня, орошаемые и осушаемые

земли, зона отдыха, пригородная зона, городская и промышленная территории и т.д.). Естественно, стоимость полосы отчуждения при этом будет изменяться в широких пределах.

Для более полного учета экологических условий функционирования ВЛ необходимо, прежде всего, определение стоимости полосы отчуждения, главными составляющими которой являются стоимость отведенных земельных угодий и вырубка лесных насаждений, последствия ограничения хозяйственной деятельности в зоне прохождения ВЛ и снижения средозащищенной деятельности в зоне прохождения ВЛ и снижения средозащитной, сырьевой, биологической, рекреационной ценности природных ресурсов. В дополнение к этому необходимо учесть затраты по ограничению акустического шума, радиопомех и напряженности электрического поля, которые определяются конструкцией опор, числом и диаметром проводов фазы, а также расстоянием от проводов до земли в середине пролета. За пределами охранной зоны необходимо учитывать воздействия ВЛ на окружающую среду с точки зрения эстетики: ущерб красоте окружающего ландшафта в живописных местах территории страны, вблизи населенных пунктов, зон отдыха, культурных, исторических, археологических памятников, в пределах видимости с больших автострад, железных дорог и т.д.

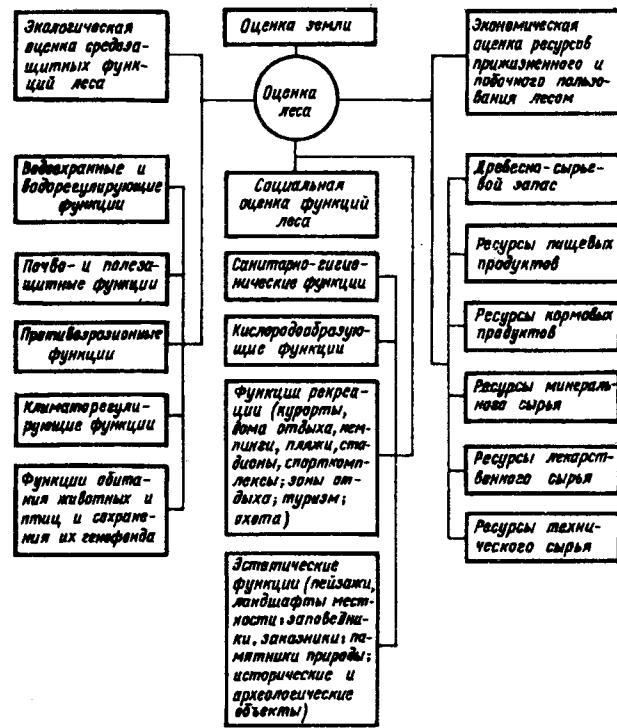
Основной предпосылкой для бережного отношения и оптимального использования природных ресурсов при проектировании, сооружении и эксплуатации ВЛ является всесторонний учет их воздействий на компоненты окружающей среды и правильная экономическая оценка природных ресурсов с учетом конкретных условий прокладки линий: природно-климатического района, ценности почвы, произрастающих сельскохозяйственных культур и лесных насаждений, среды обитания животных и птиц, рекреационного и эстетического назначения местности, природно-исторических ценностей и т.д.

Приведенные в обсуждаемой статье данные о доле стоимости земли в общей стоимости сооружения 1 км ВЛ 330—750 кВ в зарубежных странах (10—21%) и в наших странах (до 5%) подтверждают изложенные соображения, что ряд воздействий на компоненты окружающей среды и их последствия у нас не учитываются при проектировании, строительстве и эксплуатации ВЛ. Этой долей охватывается и прохождение ВЛ по лесным угодьям. Последнее имеет большое значение, так как протяженность ВЛ, прокладываемых по лесу, в отдельные годы составляет около половины общей протяженности ВЛ, вво-

димых в год<sup>1</sup>.

Анализ комплексной оценки леса, приведенный на рисунке, показал, что вследствие органической связи в природе воздействие ВЛ на окружающую среду не ограничивается одной компонентой, а может проявляться в нескольких видах. Так, вырубка лесных насаждений оказывает отрицательное влияние на растительный и животный мир, климат и экономику районов, эстетические и рекреационные условия жизни общества.

При проектировании линий электропередачи в настоящее время учитывается стоимость только одной компоненты окружающей среды (на рисунке блок — древесно-сыревой запас). Вся ос-



тальная польза леса, как правило, при проектировании не учитывается. Между тем, по данным ученых-лесоводов польза только от социальных функций леса может превышать доход, получаемый от древесины, а экономический ущерб, причиняемый государству вырубкой водоохранных лесов, значительно превышает стоимость древесины. Поэтому экономическая оценка экологических и социальных функций леса становится такой же необходимой частью интегральной эколого-экономико-социальной оценки, как и оценка древесно-сыревых функций.

<sup>1</sup> Щитович А.В., Кудояров А.Л. О факторах, влияющих на стоимость строительства ВЛ.— Энергетическое строительство, 1983, № 5.

При прокладке ВЛ по сельскохозяйственным угодьям наиболее характерными воздействиями, не учитываемыми при проектировании, являются:

ограничение хозяйственной деятельности в зоне влияния ВЛ на всем ее протяжении — отвод территорий под ВЛ, которые не могут использоваться под застройку или зону отдыха, ограничение применения авиации и машинного орошения, ухудшение условий работы сельскохозяйственных машин и механизмов из-за механических препятствий, увеличение площадей необрабатываемых участков земли вокруг опор сверх площадей, отведенных под строительство (из-за ограничения применения сельскохозяйственных машин и механизмов);

порча ценных плодородных слоев земли при строительстве и ремонте ВЛ;

нарушение почвенно-растительного комплекса и рельефа местности, способствующих образованию эрозии, дефляции, оползней, оврагов и др;

ограничение и нарушение путей миграции животных и птиц;

массовая гибель крупной птицы, особенно в степных районах, как от поражения ее электрическим током, так и от механических повреждений при столкновении в ночное время с опорами ВЛ во время массовых перелетов и т.п.;

влияние на условия жизни населения вблизи ВЛ — дискомфорт, обусловленный безопасностью, акустическим шумом, воздействием на телевидение, радио, связь и различные измерительные приборы;

снижение рекреационных функций окружающей среды;

ухудшение эстетического восприятия ландшафта в местах прохождения ВЛ;

воздействие на природно-исторические памятники.

Учет перечисленных факторов при проектировании ВЛ является исключительно важной и в то же время весьма сложной и многообразной проблемой. Сложность объясняется тем, что ВЛ оказывают воздействия как на экономические, так и на экологические и социальные факторы окружающей среды, количественное описание которых разработано недостаточно. Экономическая оценка таких воздействий естественно затруднена, в некоторых случаях даже невозможна.

Можно выделить следующие подходы для учета этих воздействий на данном этапе: использование теории нечетких свидетельств, искусственной шкалы, а также натуральных или «абсолютных» показателей, отмеченных автором обсуждаемой статьи.

Все годы ставки платежей за пользование земельными, лесными и другими ресурсами были

значительно занижены по сравнению с их народнохозяйственной ценностью. К тому же за природные ресурсы производилась только разовая оплата при сооружении ВЛ. Ежегодная же плата за постоянное пользование лесными и земельными ресурсами, как правило, не производилась. Кроме того, до сих пор при расчетах не учитываются показатели, характеризующие полезность природных ресурсов: биологическую, сырьевую, средозащитную, эстетическую, рекреационную и др.

Для создания нового экономического механизма, регулирующего воздействий хозяйственной деятельности на окружающую среду правительства государств, входящих в СНГ, в последнее время значительно изменили свое отношение к этой проблеме. Так, Совет министров Республики Беларусь значительно повысил нормативы возмещения потерь лесо- и сельскохозяйственного производства при вырубке лесов и изъятии из оборота земель, а также ввел ежегодную плату за землю в формах земельного налога или арендной платы, размер которой зависит от качества и местоположения земельных участков.

Следует отметить, что более полный учет экологических факторов при проектировании ВЛ электропередачи существенно повысит их стоимость и стоимость передачи электроэнергии. Предварительный экономический анализ показал, что повышение стоимости ВЛ может составить 10—20% и более в зависимости от выбранной трассы. Эти повышения становятся особенно существенными при прохождении ВЛ по лесным массивам и густонаселенным регионам, где наряду с экономическими особенно важными и ценными являются экологические и социальные факторы окружающей среды.

Таким образом, более полный учет экологических факторов при проектировании ВЛ электропередачи позволит достоверно выявить и учесть действительный ущерб, наносимый народному хозяйству, а также повысить культуру проектирования. В целом обсуждаемую статью следует оценить положительно. Поставленные в ней вопросы и особенно проблема учета экологического фактора при выборе типа и других параметров воздушной линии электропередачи является весьма важной и актуальной.

*Авторы: Свидерская Оксана Валентиновна — ассистент кафедры экологии Белорусской государственной политехнической академии (г. Минск).*

*Свидерский Валентин Филиппович — главный инженер отдела проектирования энергетических систем «Белэнергосетьпроекта» (г. Минск).*

## Изобретатель «русского света»

(К 100-летию со дня смерти П.Н.Яблочкова)

ШНЕЙБЕРГ Я.А.

«С гордостью вспоминаем мы о талантливом изобретателе; наряду с Петровым, Якоби, Ленцем он участвовал в основании науки и техники электричества».

Из некролога в журнале «Электричество», 1894, № 7

Поднимаясь на эскалаторе в наземный вестибюль станции «Электрозаводская» московского метрополитена, можно увидеть на стенах несколько барельефов выдающихся электротехников и среди них Павла Николаевича Яблочкова — изобретателя ставшей знаменитой электрической свечи, первого электротехника, предложившего производить электрическую энергию на «электрических заводах» и доставлять ее в квартиры подобно газу и воде. Символично, что барельеф автора идеи создания «электрических заводов» установлен именно на станции «Электrozаводская».



Павел Николаевич родился 2(14) сентября 1847 г. в одном из имений родителей в Сердобском уезде Саратовской губернии. Его родители происходили из старинного рода, но ко времени рождения сына были обедневшими мелкопоместными дворянами.

До 1858 г., когда Павел Николаевич был определен в Саратовскую гимназию, он обучался дома. По семейным традициям он должен был быть отдан в кадетский корпус, но мальчик рос болезненным и слабым ребенком, и военная карьера (правда, ненадолго) его миновала. По устным преданиям, еще в ранней юности он проявлял склонность к изобретательству, которое позднее стало делом всей его жизни.

Профессиональный и общекультурный уровень большинства учителей саратовской гимназии был довольно низким, и после почти четырех лет обучения Яблочкову не удалось получить ни прочных знаний, ни хорошего воспитания. Поэтому

родители решили подготовить его к поступлению в одно из военно-учебных заведений. Выбор пал на известное в Петербурге Николаевское инженерное училище, в котором инженерные наклонности молодого Яблочкова могли получить заметное развитие. Для подготовки к сдаче экзаменов гимназических знаний было недостаточно, и в 1863 г. Яблочкова определяют в Петербургский пансион, руководимый известным впоследствии военным инженером и композитором Цезарем Кюи. Под его руководством Яблочков получил первые прочные основы общего образования, у

него возник интерес к научным знаниям. Осенью 1863 г. Яблочков был зачислен в младший (кондукторский) класс Инженерного училища.

Несмотря на то, что среди преподавателей училища были такие выдающиеся ученые, как И.А. Вышнеградский, М.В. Остроградский и др., усиленные строевые занятия, подробное изучение фортификации не удовлетворяли пытливого юношу, серьезно увлекавшегося достижениями техники.

Через три года Яблочков в чине подпоручика Саперного батальона инженерной команды Киевской крепости начал первые шаги военно-инженерной деятельности, не вызывавшей в нем заметного интереса. Поэтому прослужив офицером чуть более года, он в конце 1867 г. увольняется по болезни в отставку.

В 60-е годы прошлого века начинается все более широкое применение электричества для практических целей, в особенности для элект-

ромагнитной телеграфии и гальванопластики. В русской армии применяется магнитоэлектрический генератор Б.С. Якоби для воспламенения электрических мин, им же было впервые продемонстрировано использование электрического двигателя для привода в движение судна. В 1866 г. была установлена телеграфная связь между Европой и Америкой. Открытие принципа самоизвестования электрических машин дало заметный толчок к расширению производства и практическому применению динамо-машин, в частности для целей электрического освещения.

Значительных успехов достигли русские военные электротехники в создании оригинальных электрических подводных мин и запалов, в разработке конструкций первых электроавтоматических устройств.

Неудивительно, что всеобщий интерес к практическим применениям электричества не прошел незамеченным и для П.Н. Яблочкива, который внимательно следил за успехами электротехники.

Он решается приобрести электротехническое образование и поступает в Техническое гальваническое заведение — единственное в России специальное электротехническое учебное заведение, где в течение года можно было обучаться военно-минному делу, устройству и применению гальванических элементов, военной телеграфии.

О высоком уровне преподавания электротехники в этом заведении можно судить хотя бы по тому, что теоретический курс электричества, магнетизма и гальванизма читал крупнейший физик того времени профессор С.-Петербургского университета Ф.Ф. Петрушевский. Программой были предусмотрены практические полевые занятия офицеров, в частности, производство взрывных работ посредством электрических мин.

Осенью 1869 г. Яблочкив заканчивает Гальваническое заведение и вновь зачисляется в свой Киевский саперный батальон, в котором возглавляет гальваническую команду. Получив электротехническое образование, он еще глубже проникся пониманием огромных перспектив практического применения электричества, но будучи батальонным адъютантом, по долгу службы должен был заниматься хозяйственными вопросами и канцелярскими делами.

Убедившись в невозможности полностью отдаваться любимому делу, Яблочкив выходит в отставку, получает годичный отпуск, переезжает в Москву и поступает на должность помощника начальника телеграфной службы Московско-Курской железной дороги, а в 1872 г. окончательно увольняется с военной службы.

Начинается новый этап в жизни Павла Ни-

колаевича, полной творческих удач и выдающихся изобретений в области электротехники, принесших ему мировую славу.

Переезд П.Н. Яблочкива в Москву совпал с периодом активной деятельности московских учёных и инженеров по подготовке Московской политехнической выставки, открытие которой приурочивалось к 200-летию со дня рождения Петра Первого (30 мая 1872 г.). Эта выставка, а также Общество любителей естествознания, антропологии и этнографии и Московский политехнический музей явились своеобразными школами формирования Яблочкива как инженера.

Среди деятелей науки и техники, с которыми встречался Павел Николаевич, было немало талантливых физиков и электротехников, позднее прославившихся своими открытиями в области электричества, в частности, В.Н. Чиколов (1845—1898), А.С. Владимирский (1827—1880), А.Г. Столетов (1839—1896).

Среди экспонатов политехнической выставки было несколько оригинальных электрических машин, швейная машина с электрическим двигателем (В.Н. Чиколов), башенные электрические часы, несколько образцов гальванопластических работ. Там же демонстрировался чернопишущий телеграфный аппарат, построенный под руководством Яблочкива в мастерских Московско-Курской железной дороги.

Осенью 1872 г. начала свою работу постоянная комиссия отдела прикладной физики Политехнического музея, возглавляемая А.С. Владимирским, организатором научно-технического сообщества московских электриков.

Участвуя в работе и заседаниях этой комиссии, Яблочкив подробно ознакомился с содержанием новейших разработок и изобретений в области электротехники не только в России, но и за рубежом. Здесь окрепла его дружба с В.Н. Чиколовым, состоялось знакомство с талантливым изобретателем электрических приборов и машин Н.Г. Глуховым, с которым позднее он создал совместное предприятие — Мастерскую физических приборов. Сам Яблочкив весьма успешно ремонтировал приборы, разработал электрическое сигнальное устройство для регулирования температуры в железнодорожных вагонах.

Работая в комиссии, Яблочкив узнает об удачных опытах А.Н. Лодыгина по конструированию и применению ламп накаливания. В конце 1873 г. Павел Николаевич приходит к твердому убеждению о необходимости организации собственной мастерской физических приборов, в которой он мог бы заняться увлекавшими его экспериментами по использованию электрического тока для

целей освещения.

Он оставляет службу на Московско-Курской железной дороге и вместе с Глуховым открывает собственную мастерскую по ремонту электрических машин, аппаратов и устройств, применяемых при электролизе, в гальванопластике, электротерапии. Такой мастерской в Москве не было, и Яблочков полагал, что выполняя различные заказы клиентов, он одновременно сможет заниматься разработкой своих изобретений, реализацией личных технических идей, возникших у него при эксплуатации разнообразных электротехнических устройств. Он также полагал, что собственное предприятие, которое не будет испытывать недостатка в заказах, принесет ему некоторый доход и поможет улучшить весьма скромное финансовое положение его семьи, которая состояла из жены и троих детей.

Вместе с Глуховым они закупают необходимое оборудование и приступают к ремонту различной аппаратуры.

Особенно заинтересовала Яблочкова идея создания дуговой электрической лампы с электромашинным регулятором, спроектированным Чиколовым.

Как известно, при сгорании электродов электрической дуги расстояние между ними увеличивается и дуга может угаснуть. Поэтому одним из первых электроавтоматических устройств, получивших широкое применение, были регуляторы для дуговых ламп. В первых дуговых лампах

расстояние между электродами регулировалось вручную, затем стали применять механические регуляторы, которые уступили место электрическим (рис. 1).

П.Н. Яблочкова очень увлекла проблема создания надежного регулятора дуговых ламп, тем более, что он на собственном опыте убедился в его необходимости. Произошло это в 1874 г. при весьма любопытных обстоятельствах. Осенью 1874 г. по Московско-Курской железной дороге должен был проезжать на отдых в Крым Александр II. Яблочков предложил освещать путь для царского поезда по ночам с помощью дуговой электрической лампы с регулятором, предложенным французским изобретателем Фуко. Лампа Фуко действовала ненадежно, и Яблочков расположился на специальной небольшой платформе спереди локомотива и всю ночь просидел на холодном ветру, помогая руками поддерживать надежную дугу, так как погасание лампы даже на короткое время могло вызвать непредвиденные последствия, тем более, что у полиции имелись сведения о готовившемся покушении на царя. Яблочкову пришлось пережить немало тягостных минут, чтобы обеспечить нормальную работу батареи гальванических элементов, следить за исправностью электропроводки и в особенности не допустить погасания лампы. Надо думать, что в эту холодную ночь его не оставляла мысль о создании надежного автоматического регулятора для дуговой лампы.

Кстати, следует отметить, что это был первый в мире опыт электрического освещения железнодорожного пути. Только спустя восемь лет французский журнал «La lumière électrique» (1882, т. 6) описывал подобный случай применения прожектора на паровозе.

По отзывам одного из современников Яблочкова, его мастерская была центром «смелых и остроумных электротехнических предприятий, блиставших новизной и опередивших на 20 лет течение времени». Здесь разрабатывались детали динамо-машины, совершенствовались аккумуляторы, «изобретались остроумные системы регуляторов электрического света». Но и здесь «было все, кроме практичности». Нередко Яблочков и Глухов, увлекшись экспериментами, вовремя не выполняли взятые заказы, оказывались в долгах у кредиторов, коммерческие дела владельцев мастерской шли из рук вон плохо, им могла угрожать долговая тюрьма.

Осенью 1875 г., незадолго до того, как мастерская была закрыта, Яблочков делает открытие, приведшее его к созданию знаменитой электрической свечи.

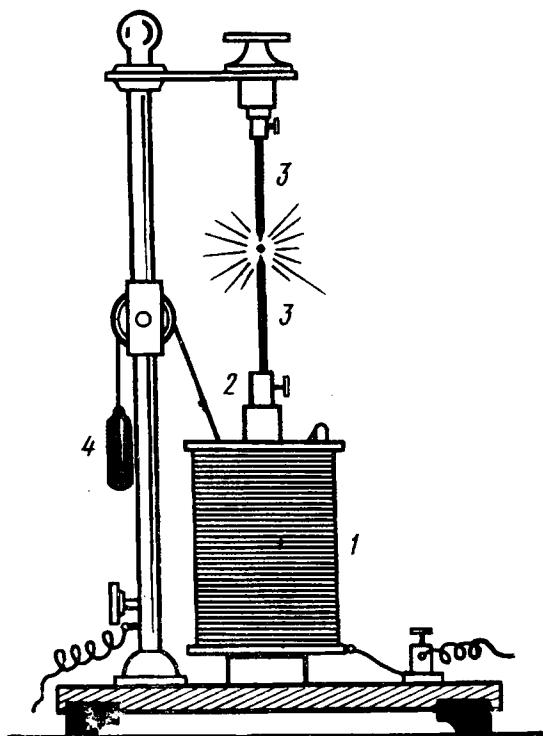


Рис. 1. Дуговая электрическая лампа с электромагнитным регулятором (по мере сгорания углей 3 груз 4 вытягивает железный стержень 2 из катушки электромагнита 1)

### Изобретение электрической свечи.

При проведении опыта электролиза поваренной соли два угольных электрода, расположенные параллельно, при «излишнем сближении» коснулись нижними концами и, так как угли были под высоким напряжением, возникла яркая электрическая дуга. Завороженные этим необычным зрелищем: Яблочков и Глухов «любовались интересным явлением внутри жидкости сквозь толстые стенки дорогостоящего стеклянного сосуда и «предоставили углем гореть до конца, а сосуду треснуть». Увидев дугу между концами почти параллельно расположенных углей, Яблочков воскликнул: «Смотри, и регулятора никакого не нужно!»

Если все изобретатели дуговых ламп располагали электроды против друг друга (вертикально или горизонтально), и при горении дуги расстояние между концами увеличивалось, то Яблочкову пришла в голову совершенно оригинальная мысль: расположить электроды параллельно (см. рис. 2), тогда по мере сгорания расстояние между концами электродов не изменится и регулятор будет не нужен.

Это было гениальное открытие, значительно упрощающее конструкцию дуговой лампы и избавляющее ее от самой дорогой детали — регулятора. Автору открытия было всего 28 лет!

Нужно было несколько дней, чтобы принципиально новую идею воплотить в жизнь, но кредиторы, потеряв надежду получить причитающиеся им долги, возбудили судебное дело, и Яблочков оказался банкротом. Если он будет посажен в долговую тюрьму, его новая идея может погибнуть. И он принимает невыносимо трудное, но смелое решение: уехать за границу, скрыться

от кредиторов и от тюрьмы, но спасти свое изобретение.

На основании тщательного изучения всех материалов о жизни и деятельности П.Н. Яблочкова можно утверждать, что все фундаментальные изыскания и оригинальные идеи, послужившие основой его важнейших изобретений, были осуществлены и принципиально разработаны в Москве, в мастерской физических приборов, ставшей своеобразной колыбелью многих электротехнических изобретений, давших огромный толчок всей электротехнике.

Приехав в Париж, Яблочков сразу же встретился с членом Французской академии наук, известным физиком и изобретателем Л.Ф.К. Бреге, владевшим заводом для производства точных приборов (в том числе телеграфных аппаратов и электрических машин).

Ознакомившись с идеей Яблочкова создать электрическую дуговую лампу без регулятора, Бреге сразу оценил перспективность этого изобретения и понял, какую выгоду получит он от привлечения Яблочкова к работам на заводе. И уже в марте 1876 г. П.Н. Яблочков получил сразу несколько патентов, в том числе под № 112024 от 23 марта на ставшую знаменитой электрическую свечу, а в ноябре этого же года — приложение к патенту на применение индукционных катушек для осуществления «дробления света». Кроме того, им были получены патенты на «электродвижущий элемент», магнитоэлектрическую машину переменного тока без вращающихся частей и др.

В апреле 1876 г. в Лондоне открылась выставка физических приборов. Яблочков принимал в ней участие в качестве руководителя павильона Бреге, а также в качестве изобретателя. «Электрическая свеча» была впервые продемонстрирована публично и стала сенсацией выставки, приведшей в восторг зрителей, сумевших по достоинству оценить «всю оригинальность этого изобретения». Действительно, свеча была самым интенсивным из всех известных источников света небольшой мощности. Она была дешевой, простой по конструкции, не требовала регулятора. С изобретением свечи электрическое освещение перестало быть предметом роскоши, оно становилось доступным для всеобщего пользования. Желтоватый свет керосиновых ламп и голубенький огонек газовых рожков казались слабыми и ничтожными перед ярким светом электрической свечи. Свеча привлекла внимание не только ученых и изобретателей, но и коммерсантов и владельцев крупных промышленных предприятий.

Электрическая свеча представляла собой два

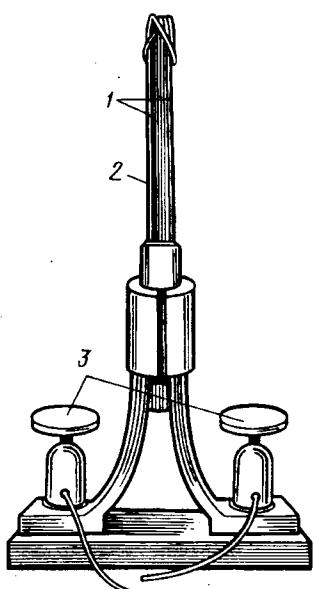


Рис. 2. Электрическая свеча: 1 — угольные электроды; 2 — изолирующий слой; 3 — зажимы для подключения к источнику электроэнергии

угольных электрода, расположенных параллельно, изолированных один от другого слоем каолина или гипса и укрепленных в специальных клеммах светильника, которые соединялись с источником тока. Для зажигания дуги на выступающие концы угольных электродов накладывалась тонкая угольная пластинка, загоравшаяся при первом пропускании тока. Пламя возникало в верхней части углей, и они постепенно сгорали, напоминая обычную свечу (рис. 2).

В течение последующих лет Яблочков получил несколько дополнений к основному патенту, в которых предусматривалось повышение надежности горения и яркости свечи. Им были созданы специальные фонари («электрические подсвечники») для нескольких свечей с ручным, полуавтоматическим и автоматическим переключателем.

В Париже создаются компания и специальная фабрика по производству свечей. Их изготавливались до 8000 штук в день, а цены быстро снижались. Эксплуатация свечи сулила большие прибыли, в разных странах (в том числе Англии и США) образуются компании по устройству освещения по системе Яблочкова.

Электрическими свечами освещаются большой универсальный магазин в Париже «Лувр» (где 80 свечей заменили 2000 газовых рожков), а затем и ряд других крупных магазинов, огромное помещение ипподрома, вмещавшего 8000 зрителей, улица Оперы в Париже (наибольшее расстояние от генератора до источника света составляло 1000 м; это была самая дальняя для того времени передача электроэнергии от генератора до приемника). По системе Яблочкова освещаются порты и корабли, помещения военного и специального назначения. Как писал Яблочков, «из Парижа электрическое освещение распространилось по всему миру, дойдя до двор-

цов шаха Персидского и короля Камбоджи».

**Переменный ток — в практику. Первый трансформатор. «Электрические заводы».**

Продолжая работы по совершенствованию своей системы электрического освещения, Яблочков делает еще ряд изобретений, сыгравших поистине революционную роль в развитии электротехники.

Прежде всего расширение практического использования свечи способствовало внедрению переменного тока в практику. Дело в том, что при подключении углей к источнику постоянного тока положительный электрод сгорал вдвое быстрее, поэтому его приходилось изготавливать вдвое толще, чем отрицательный. Проведя ряд экспериментов, Яблочков доказал, что питание свечи переменным током будет более рациональным, так как оба электрода будут одинаковыми. Это повлекло за собой интенсивное промышленное производство генераторов переменного тока, ранее не находивших применения.

Новая система «дробления света» сделала применение свечи еще более эффективным и экономичным. Имя изобретателя украшает газеты всего мира, предложенный им способ освещения называли «русским светом», «северным светом». Компании по эксплуатации патентов получили колоссальные прибыли и не спрашивались с огромным числом заказов. Триумф электрической свечи стал еще более значительным после Всемирной выставки в Париже в 1878 г., еще раз продемонстрировавшей простоту и несложность эксплуатации новой системы электрического освещения.

В конце 1878 г. Яблочков полностью рассчитался с кредиторами в Москве. Теперь он мог спокойно продолжать эксперименты, но нужно было решить еще одну проблему, ведь каждая

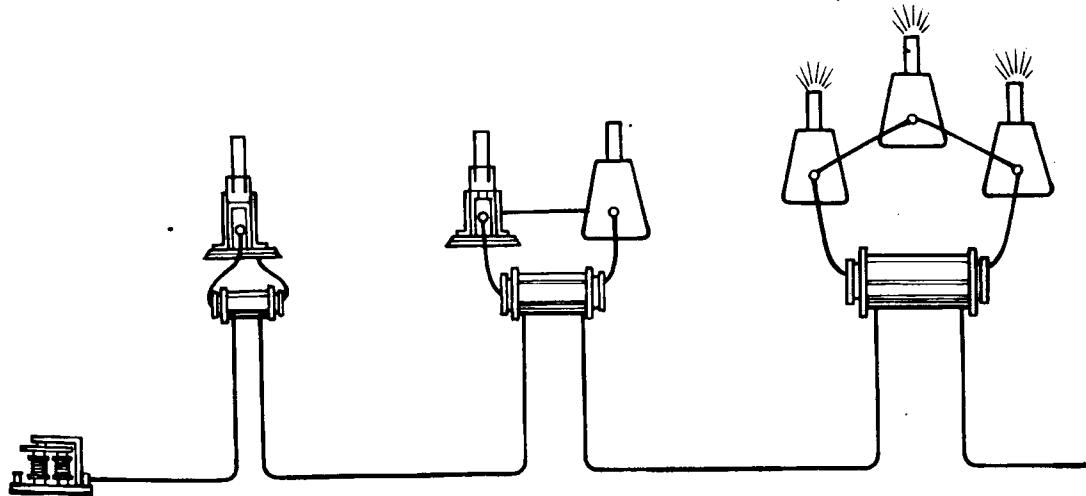


Рис. 3. Схема распределения электроэнергии с помощью индукционных катушек (трансформаторов):  
прерыватель; индукционные катушки; электросвечи

свеча горела в течение полутора часов и питалась от отдельного генератора.

Величайшей заслугой нашего соотечественника перед мировой электротехникой является изобретение системы «дробления электрического света», т.е. включение произвольного числа дуговых ламп в цепь, питаемую от одного генератора с тем, чтобы погасание одной из ламп не отражалось на работе других. Только тогда электрическая свеча могла получить массовое применение.

Из нескольких способов «дробления света», предложенных Яблочковым, практическое применение получили два. Первый — секционирование обмотки якоря генератора, в результате чего к нему подключалось от двух до четырех независимых цепей, в каждую из которых включалась одна или (последовательно) две—три свечи. Электротехнические заводы стали выпускать специальные генераторы для осветительных установок, мощность которых указывалась в «свечах» — в зависимости от числа свечей, которые могли к нему подключаться. Второй — наиболее перспективный — с применением индукционных катушек, явившихся прообразом трансформатора. В этой схеме впервые получили оформление основные элементы современной энергосистемы: первичный двигатель, генератор, линия передачи, трансформатор — приемник. Индукционные катушки в этой схеме представляли собой однофазный трансформатор с разомкнутым магнитопроводом. Если цепь подключалась к источнику постоянного тока, то в схеме был предусмотрен прерыватель (рис. 3).

Казалось бы, всего сделанного вполне достаточно для того, чтобы пожинать плоды своих изобретений. Но Павел Николаевич был выдающимся изобретателем своего времени, он никогда не останавливался на достигнутом и всю жизнь без устали трудился над решением наиболее актуальных проблем, выдвигаемых практикой, жизнью.

Разработанная им система освещения не могла быть достаточно эффективной в условиях существовавшего в то время децентрализованного производства электрической энергии: обычно потребители подключались к небольшим электростанциям (блок-станциям), расположенным около потребителей.

Современному читателю может показаться курьезным проект установки, спроектированной в начале 70-х годов для освещения вокзала в Страсбурге. Предполагалось установить 60 дуговых ламп, каждая из которых должна была подключаться к отдельной динамо-машине. Но ведь для 60 генераторов нужны были еще и паровые агрегаты соответствующей мощности. С появлением

ним блок-станций, обслуживающих несколько близко расположенных потребителей, система энергоснабжения была более рациональной, но совершенно не удовлетворяла растущим требованиям развивающегося производства.

Становилось очевидным, что экономичное решение проблемы электроснабжения может быть осуществлено лишь на основе централизованного производства и распределения электроэнергии.

П.Н. Яблочков был первым электротехником, который в апреле 1879 г. в Петербурге в своей публичной лекции высказал мысль о необходимости централизованного производства электрической энергии на «электрических заводах» и доставки ее потребителям подобно тому, как доставляются газ и вода.

Это прогрессивное решение проблемы электрического освещения распространялось и на других потребителей электрической энергии и открывало новые пути в развитии электротехники как базы для становления и развития электроэнергетики. Уже в начале 80-х годов стали соружаться первые тепловые электростанции общественного пользования. Первая такая станция была построена Эдисоном в 1882 г. в Нью-Йорке. В этом случае — как и во многих других — техническая мысль русских изобретателей определила зарубежную практику.

Следует отметить, что в своей лекции об «электрических заводах» Яблочков также впервые указал на необходимость комплексного подхода к оценке экономичности введения электрического освещения, подчеркнув, что нужно обязательно учитывать и повышение производительности труда, прямо связанной с качеством освещения рабочих мест и помещений.

К глубокому сожалению Павла Николаевича, в России интерес к электрической свече был весьма сдержаным. Это объяснялось не только ее промышленной отсталостью, но и русско-турецкой войной 1877–1878 гг. Яблочков, считавший свой отъезд за границу временным, мечтал внедрить свое изобретение на Родине, тем более, что после выставки в Париже его системой освещения заинтересовалось русское Морское министерство. Яблочков принимает твердое решение вернуться в Россию и организовать русское товарищество по эксплуатации свечи. Но французские компании, владевшие всеми правами на его патенты, потребовали миллион франков — все состояние Яблочкова — за право эксплуатировать изобретение русского автора в России. Уплатив эту огромную сумму, Яблочков выезжает в Петербург. Его встречают с большим почетом, ему удается создать коммерческую компанию по изготовле-

нию электрических свечей, машин и аппаратов. В 1878—1880 гг. в Кронштадте в порту и на кораблях, в Петербурге — на Дворцовом и Литейном мостах, на площади Александринского театра, в помещении Большого театра были сооружены осветительные установки, убедительно продемонстрировавшие их преимущества перед газовым освещением. В 1882 г. на судах Балтийского флота было установлено 178 свечей Яблочкова, а на Черноморском — 62 свечи.

Успех свечи и расширение работ по применению электрического освещения активизировали деятельность русской электротехнической общественности, вызвали потребность в создании электротехнического центра. По инициативе П.Н. Яблочкова, В.Н. Чиколова, Д.А. Лачинова и других членов Русского технического общества в начале февраля 1880 г. при этом обществе был создан электротехнический (VI) отдел, вице-председателем которого был избран П.Н. Яблочков. По его инициативе и при активном участии была проведена в апреле 1880 г. в Санкт-Петербурге первая Всероссийская электротехническая выставка, ставшая первой в мире специализированной выставкой по электротехнике. Успеху выставки способствовали демонстрации изобретений Яблочкова и его личное участие в качестве «объяснителя».

Средства, полученные от выставки, послужили фондом для создания первого русского электротехнического журнала «Электричество», вышедшего в июле 1880 г. Этот журнал вскоре стал одним из крупнейших в мире научно-технических журналов по электротехнике и остается таковым до настоящего времени.

Но перспективы деятельности Яблочкова в России не внушили серьезных надежд. Дальнейшее внедрение системы электрического освещения было связано с рядом трудностей, так как почти все оборудование и даже прессованные угли для свечей приходилось ввозить из Франции. Яблочков, занимаясь научными разработками, в частности, в области электрических машин, по ряду причин не довел их до конца и не сделал ни одной заявки на изобретение.

Было еще одно важное обстоятельство, сдерживавшее дальнейшее внедрение электрической свечи.

В 1879 г. из Америки стали поступать известия об успешных экспериментах с лампой накаливания известного американского изобретателя Т.А. Эдисона (1847—1931). Первые публичные демонстрации лампы накаливания были осуществлены в России еще в 1870 г. русским электротехником А.Н. Лодыгиным (1847—1923). Однако, несмотря на последующие усовершенствова-

ния, лампы Лодыгина в то время не могли конкурировать с простой и дешевой электрической свечей. В начале 1880 г. стало известно, что Эдисону удалось весьма удачно разработать детали лампы накаливания, имевшей несомненные преимущества перед электрической свечой, которые Яблочков недооценивал. Правда, среди его изобретений есть и каолиновая лампа накаливания.

Эдисон не был изобретателем лампы накаливания, но при поддержке крупных монополий ему удалось усовершенствовать конструкцию лампы, обеспечив в ней высокий вакуум и изготовив нить накала из специально обугленного бамбукового волокна, а также создать удобную систему включения лампы в электрическую сеть (шоколь, патрон). Поставив производство лампы на коммерческую основу, Эдисон также реализовал идею Яблочкова о централизованном производстве и распределении электроэнергии и построил, как уже отмечалось, первую электрическую станцию общественного пользования.

Естественно, что из Петербурга было труднее, чем из Парижа, следить за быстро развивающимися событиями в области электрического освещения, тем более, что царское правительство еще раз продемонстрировало свою незаинтересованность в отношении новейших достижений, которые должны были демонстрироваться на открывающейся в 1881 г. в Париже Международной электротехнической выставке. Яблочков снова выехал в Париж, не ликвидировав своего «Товарищества», так как надеялся быстро вернуться. Но его надежды не оправдались.

Электрическая свеча уступала место более удобному и экономичному источнику освещения, для широкого внедрения которого уходящая в прошлое свеча подготовила вполне благоприятную почву. И все же заслуги П.Н. Яблочкова были общепризнанными. На Международном конгрессе электриков в Париже он назначается членом конгресса, а в 1881 г. удостаивается высочайшей награды — Ордена Почетного Легиона. Труды П.Н. Яблочкова были признаны Международным жюри по электротехнической выставке «вне конкурса».

Электрическим освещением Павел Николаевич заниматься больше не стал; последние 13 лет своей жизни он посвятил решению другой важной проблемы — генерированию электроэнергии, созданию разнообразных конструкций динамо-машин и гальванических элементов. Надеясь получить поддержку в реализации своих новых изобретений, он решил остаться в Париже.

Ему удалось получить несколько патентов на усовершенствованные динамо-машины и электродвигатели, на электрохимический гальваниче-

ский элемент без жидкости. Предложенный им новый тип гальванического элемента — так называемый «топливный элемент» — ярко отражал новаторские идеи изобретателя, которые, однако, были реализованы более полувека спустя. Много надежд возлагал Павел Николаевич и на конструкцию автоаккумулятора, но и она не получила практического применения.

Материальное положение и душевное состояние Павла Николаевича Яблочкива с каждым годом ухудшались, изнурительный труд все более скazyвался на здоровье. Резкое ухудшение самочувствия вызвало взрыв на квартире изобретателя во время опытов с натриевыми элементами горения.

Яблочкиков возвращается в Петербург, но дельцы и коммерсанты, обязанные ему своим положением, отвернулись от Павла Николаевича, считая его неудачником. Только доброжелательное отношение инженеров-электротехников несколько скрасило недолгое пребывание Яблочкикова в столице.

Осенний петербургский климат резко отразился на ослабленном здоровье Павла Николаевича. Он решил поехать на родину в Саратовскую губернию, где жили его родные, отдохнуть, а затем продолжить путь на Кавказ для лечения.

Будучи тяжело больным, он однако, даже в саратовской гостинице устроил домашнюю лабораторию. Но сердечная болезнь и водянка с каждым днем прогрессировали, и 19 (31) марта 1894 г. Павел Николаевич скончался.

Тело П.Н. Яблочкикова по его желанию было погребено в родовом склепе близ с. Сапожок, недалеко от тех мест, где родился Павел Николаевич.

Некрологи в связи со смертью П.Н. Яблочкикова были опубликованы во многих русских и зарубежных журналах и газетах. В частности, в журнале «Электричество» (1894 г., № 7) подчеркивалась оригинальность конструкции электрической свечи: «Простота решения... поистине изумительна, и в то же время изобретение принадлежит всецело П.Н. Яблочкикову. Никогда никто не оспаривал его приоритета... Трудно описать весь эффект, произведенный свечой Яблочкикова, благодаря которой электрический свет (*lumière russe, lumière Jablochhoff*) быстро распространился по бульварам, по площадям и театрам Парижа, появился в магазинах и частных домах... свечи Яблочкикова были установлены на набережной Темзы, в British Museum (Лондон), в С.-Петербурге..., в Мадриде, в Неаполе, в Брюсселе, в Индии, в С. Доминго». Журнал «Электротехнический вестник» (1894 г., № 4) отмечал, что имя Яблочкикова «...пользовалось всемирной известностью и не-

разрывно связано с историей развития электротехники... Имя Яблочкива не умрет и будет всегда занимать почетное место в истории и науке». Высокая оценка трудов Яблочкива была дана в немецком журнале «Elektrotechnische Zeitschrift», французском «La lumière électrique», английском «Electrician» и др.

В январе 1900 г. в С.-Петербурге начал работу Первый Всероссийский электротехнический съезд. Открывая первое заседание, председатель съезда, известный ученый, проф. Н.П. Петров подчеркнул выдающиеся заслуги П.Н. Яблочкива, указав, что «...свеча Яблочкива дала электротехнике такой же сильный толчок на пути разнообразнейших практических применений электричества, какой паровая машина Уатта дала применению пара в промышленности».

На съезде было предложено собрать средства для сооружения монумента П.Н. Яблочкиву, «...который послужит грядущим поколениям вечным свидетельством, как благодарное Отечество ценит заслуги доблестных своих сынов». Но реализовать это предложение не удалось.

В 1947 г. в связи со 100-летием со дня рождения нашего талантливого изобретателя было принято постановление правительства об увековечивании его памяти. Учреждены почетная премия его имени, присуждаемая президентом Академии наук, и именные стипендии для студентов нескольких электротехнических учебных заведений. Имя П.Н. Яблочкива присвоено Саратовскому электротехническому техникуму и Московскому светотехническому заводу. В 1952 г. у могилы П.Н. Яблочкикова был воздвигнут памятник, бережно охраняемый земляками, установлены мемориальные доски на домах в Москве, С.-Петербурге, Саратове, где жил Павел Николаевич. Улицы его имени есть в Москве, С.-Петербурге, Саратове, Париже и других городах.

Сегодня имя и труды Павла Николаевича известны всему миру, и мы по праву гордимся необычайно одаренным и скромным соотечественником, прославившим нашу Родину.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Академия наук СССР. Павел Николаевич Яблочкиков. Труды, документы, материалы. Составитель Л.Д. Белькинд. — М.: Изд-во АН СССР, 1954.
2. Белькинд Л.Д. Павел Николаевич Яблочкиков. — Изд-во АН СССР, 1962.
3. Шатален М.А. Русские электротехники XIX в. — М.; Л.; Госэнергоиздат, 1955.
4. Веселовский О.Н., Шнейберг Я.А. Энергетическая техника и ее развитие. — М.: Высшая школа, 1976.
5. Веселовский О.Н., Шнейберг Я.А. Очерки по истории электротехники. — М.: Изд-во МЭИ, 1993.

# Михаил Иванович Царев

(К 85-летию со дня рождения)

Михаил Иванович Царев — лауреат Государственной и Ленинской премий, известный специалист в области релейной защиты и автоматики энергосистем. Трудовую деятельность начал в 1924 г., а по окончании в 1933 г. электротехнического факультета МВТУ, впоследствии преобразованного в МЭИ, был направлен на работу в Мосэнерго. Именно тогда он связал свою жизнь с релейной защитой и автоматикой.

Во время эвакуации в 1941—1942 гг. Михаил Иванович работал начальником центральной службы релейной защиты в Куйбышевэнерго. В 1945 г. поступил в аспирантуру ЦНИЭЛ (ныне ВНИИЭ) и стал работать в лаборатории релейной защиты. Будучи квалифицированным специалистом-практиком, Михаил Иванович проявил незаурядные способности в области теории релейной защиты. Кандидат технических наук, он с 1953 по 1975 г. был заведующим лабораторией релейной защиты ВНИИЭ. Обладая ценным опытом и глубокими знаниями, он и сейчас остается сотрудником коллектива лаборатории релейной защиты, где продолжает плодотворно трудиться.

Многие разработки М.И. Царева получили широкое внедре-



ние в энергосистемах страны. Еще в период работы в Мосэнерго им были спроектированы и внедрены новые схемы управления и сигнализации на электрических станциях и подстанциях, разработана и проведена модернизация дистанционных и других защит в сетях 35—110 кВ. К работам, выполненным М.И. Царевым во ВНИИЭ, относятся исследование, разработка и внедрение новых дифференциальных токовых защит синхронных генераторов, силовых трансформаторов и высоковольтных шин электрических станций и подстанций, устройств АПВ линий электропередачи и основного оборудования

ния различных напряжений, релейной защиты на оперативном переменном токе.

Под научным руководством М.И. Царева в лаборатории релейной защиты ВНИИЭ выполнены важнейшие исследования защит линий электропередачи напряжением 110—220 кВ и 330—500 кВ, разработана и внедрена новая быстродействующая и высокочувствительная защита ВЛ 750 и 1150 кВ, а также защита мощных энергоблоков.

Крупный специалист в области релейной защиты, Михаил Иванович был членом Национальной комиссии по релейной защите ГКНТ и активно участвовал в работе постоянной комиссии СЭВ по электроэнергетике.

Научную работу М.И. Царев сочетал с научно-педагогической деятельностью. Под его руководством защищили кандидатские диссертации известные сейчас специалисты в области релейной защиты и автоматики.

Трудовые заслуги Почетного энергетика М.И. Царева отмечены орденами и медалями.

Пожелаем Михаилу Ивановичу доброго здоровья и плодотворного труда.

Группа товарищей  
и учеников

полняются обширные теоретические и прикладные исследования, созданы системы мониторинга на электрических подстанциях, на батареях статических компенсаторов и реакторов. Координация этих исследований осуществляется Рабочей группой по геомагнитным нарушениям в энергосистемах при Комитете по передаче и распределению энергии Американского института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике.

Учитывая сложившуюся ситуацию и принимая во внимание, что техническое освоение Севера будет происходить в ближайшее десятилетие на фоне максимума солнечной активности, совещание считает необходимым:

1. Разработать программу комплексных исследований отрицательного воздействия гелиогеофизических возмущений на энергетические, транспортные и коммуникационные системы в Арктике с привлечением организаций геофизического профиля и энергетического профиля.

2. Обратиться в Министерство науки и технической политики РФ с обоснованием необходимости выделения средств на развертывание работ по указанной проблеме.

3. Организовать и провести в 1995 г. второе совещание по этой проблеме с привлечением более широкого круга заинтересованных организаций, включая организации, занимающиеся эксплуатацией протяженных проводящих систем (электроэнергетические системы, системы магистральной связи, трубопроводы природного топлива).

Совещание благодарит Арктический и антарктический научно-исследовательский институт за организацию совещания на высоком уровне и отмечает несомненную целесообразность его проведения.

Шварц Я.М., канд.техн. наук

## Международная конференция «О природе феномена Хессдаленской долины»

(23—27 марта 1994 г., Хессдален, Норвегия)

Конференция была посвящена анализу физической природы светящихся объектов (типа шаровых молний), регулярно появляющихся в ущелье Хессдаленской долины. То обстоятельство, что светящиеся шары наблюдаются достаточно часто, позволяет рассматривать Хессдаленскую долину как некий естественный полигон по изучению природы шаровой молнии и родственных атмосферно электрических явлений. На конференции по итогам выполнения финансировавшейся правительством Норвегии программы исследования хессдаленского феномена были рассмотрены вопросы идентификации явления, математической обработки данных наблюдений, физического и математического моделирования, организации измерений геофизических параметров в полевых условиях.

В работе конференции приняли участие ученые из семи стран: Норвегии, Швеции, России, США, Японии, Великобритании, Италии. От России бы-

ли представлены четыре доклада, посвященные исследованию естественных электрических разрядов в атмосфере и долгоживущим плазменным образованиям, получаемым в лабораторных условиях (Б.М. Смирнов — ИВТАН; Э.А. Маныкин — НЦ «Курчатовский институт»; А.И. Григорьев — Ярославский госуниверситет; Е.Т. Протасевич — Томский политехнический институт).

На конференции была принята программа исследований Хессдаленского феномена, основанная на использовании станций автоматического слежения за появлением светящихся образований в атмосфере и непрерывной регистрацией геофизических характеристик среды с международным финансированием (Япония, США, Норвегия). Предполагается участие в выполнении программы намеченных исследований и российских ученых — в разработке необходимого оборудования при анализе полученных данных.

Григорьев А.И., проф.

# **Научная сессия**

## **Отделения физико-технических проблем энергетики РАН совместно с Научным советом**

### **«Научные основы электрофизики и электроэнергетики»**

*(2 марта 1994 г., Москва)*

На сессии были заслушаны доклады ряда ведущих специалистов России по электрофизике.

В докладе д.ф.-м.н. В.В. Аполлонова «Объемные самостоятельные разряды в мощных лазерах» рассмотрены: проблема устойчивости разрядов в плотных газах, роль легкоионизуемых органических веществ в снижении класса напряжений в лазерных системах, преимущества динамического профилирования электрического поля в разрядном промежутке и реализация сверхкомпактной геометрии разрядного промежутка.

В докладе д.т.н. И.М. Бортника «Электрофизика высоких напряжений в энергетике» была поставлена задача проектирования диэлектрических сред для изоляции в энергетике и отмечена принципиальность перехода к тяжелым молекулярным газам и моделированию сильно электроотрицательных газов. Применительно к проектированию изоляционных аппаратов были рассмотрены энергетические особенности перехода стримерного образования в канал лидера. Констатировалось создание научных основ проектирования изоляции на базе сильно электроотрицательных газов, конструирования и испытания соответствующего оборудования.

Доклад д.ф.-м.н. Г.А. Дюжева «Физика газового разряда. Настоящее и будущее» был посвящен: физике термоимиссионных преобразователей тепловой энергии в электрическую, исследованию приэлектродных процессов в сильноточных дуговых разрядах, новой физической модели образования анодного пятна в сильноточной вакуумной дуге, исследованию анодных процессов в дугах атмосферного давления, перспективам применения газового разряда в электроэнергетике.

В докладе д.ф.-м.н. А.Н. Лагарькова «Электрофизика композитных материалов» рассматривались теоретические и экспериментальные методы исследований электрофизических свойств композитных материалов и приложения этих исследований к проблемам обнаружения самолетов, энергосберегающим покрытиям стекол, созданию малогабаритных конденсаторов. Была отмечена возможность технологического воспроизведения для композитных материалов любой кривой диэлектрической проницаемости, например, с несколькими переходами через нуль.

Доклад д.ф.-м.н. В.П. Смирнова «Электрофизика импульсных терраватных мощностей наносекундной длительности» был посвящен вопросам создания сильноточных ускорителей электронных пучков, многоканальной коммутации водяных низкоимпедансных линий при быстрой зарядке, фокусировка сильноточных электронных пучков в плазмозаполненном диоде, построения генераторов многотерраватного диапазона, эксплуатации комплекса «Ангара-5-1», разработки методов обострения мощности на основе плазменных размыкателей, лайнера и Z-пинчей.

В докладе д.т.н. В.И. Хвесюка «Исследования плазменных процессов и разработка плазменных устройств» были рассмотрены процессы взаимодействия плазмы с твердым веществом, теория катодных процессов электрических дуг, закономерности деградации ламп накачки, моделирование взаимодействия плазмы со стенкой термоядерного реактора, особенности высоковольтных разрядов в газах, работы по сильноточным плазменным ускорителям, плазмофизическая модель малорадиоактивного термоядерного реактора и метод селективного удаления продуктов термоядерной реакции из плазмы.

Доклад д.т.н. И.А. Шелаева «Сверхпроводящий циклотрон для электроядерного реактора» был посвящен проекту сверхпроводящей циклотронной установки, поставляющей в электроядерный реактор 10 мощных протонных пучков интенсивностью до 10 mA в каждом. Такой реактор представляется наиболее перспективным с точки зрения безопасности и экологии.

В докладе д.т.н. Г.А. Шнеерсона «Проблемы электрофизики, связанные с получением сверхсильных импульсных магнитных полей и токов» анализировались работы по получению мегагауссовых магнитных полей в лабораторных условиях, созданию мощных емкостных накопителей энергии и магнитных систем и соленоидов, теоретические и экспериментальные результаты исследований таких полей, в частности гидродинамического эффекта и диффузии полей.

В докладе д.ф.-м.н. В.Б. Розанова «Источник термоядерных нейтронов для гибридной электростанции с лазерным инициированием» была отмечена перспективность создания гибридной

ядерно-термоядерной электростанции с лазерным инициированием. Была поставлена проблема определения параметров электростанции, представляющей интерес с точки зрения наработки энергии, полной безопасности, минимальных ре-

урсов лазерной установки, максимального термоядерного выхода из машин, которую можно создать на основе существующих в нашей стране технологий.

Бутырин П.А.

## Научная сессия

# Отделения физико-технических проблем энергетики РАН совместно с Научным советом РАН по комплексным проблемам энергетики

(3 марта 1994 г., Москва)

На сессии были заслушаны следующие доклады:

Доктор техн. наук Аминов Р.З. «Теория и практика оптимизации теплоэнергетических установок электростанции»;

доктор техн. наук Андреев В.М. «Фотоэлектрическое преобразование концентрирования солнечного излучения»;

доктор техн. наук Арханов А.М. «Криология и энергомашиностроение (некоторые новые результаты)»;

доктор техн. наук Головин И.С. «Замкнутый топливный цикл ядерной энергетики»;

доктор техн. наук Грязнов Г.М. «Использование опыта создания космических ядерноэнергетических установок в энергетике будущего»;

доктор техн. наук Долгов В.Н. «Разработка и применение математического моделирования для решения комплексных задач проектирования и эксплуатации энергетических объектов»;

доктор техн. наук Дьяков А.Ф. «Проблемы надежной работы систем энергетики»;

доктор физ.-мат. наук Розанов Л.Н. «Расчет и проектирование вакуумных систем».

Бутырин П.А.

## **Влияние магнитно-ионосферных возмущений на функционирование технических средств**

*(совещание, организованное под секцией «Атмосферное электричество» четвертой секции Совета РАН по комплексной проблеме «Научные основы электрофизики и электроэнергетики» совместно с секцией энергетики Научного Совета Министерства науки и технической политики РФ по электромагнитной совместимости и Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом, Санкт-Петербург, 11 марта 1994 г.)*

Было представлено три доклада и два информационных сообщения от Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ), Военного инженерного строительного института (ВИСИ), Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (СПбФИЗМИРАН), Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова. В совещании приняли также участие специалисты Санкт-Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ), Военной инженерной космической Краснознаменной академии им. А.Ф.Можайского, Государственного института усовершенствования врачей.

Заслушав и обсудив доклады совещание отмечает:

1. Расширявшееся в последнее десятилетие промышленное освоение Севера и связанное с ним продвижение энергетических, транспортных и коммуникационных систем в высокие широты делает неотложной разработку методов оценки и предупреждения отрицательного воздействия гео-геофизических возмущений на энергетические, транспортные и коммуникационные системы в Арктике.

2. Это воздействие связано с механизмом генерации в авроральной зоне ионосферы интенсивных электрических токов, вызывающих на земной поверхности электрические поля напряженностью до десятков вольт на километр. Под действием таких полей в элементах протяженных проводящих систем (электроэнергетические системы, системы магистральной связи, трубопроводы природного топлива), имеющих гальваническую связь с землей, возникают геомагнитные индукционные токи (ГИТ).

3. ГИТ вызывают следующие неблагоприятные

эффекты в обмотках трансформаторов:  
появление высших и низших гармонических составляющих;  
резкое увеличение потребления реактивной и значительный рост потерь активной мощности;  
значительные колебания напряжения, частоты и потоков мощности;  
нагрев стали и баков силовых трансформаторов, а также усиление вибрации пластин их сердечников;  
неправильное и несанкционированное срабатывание устройств релейной защиты и системной автоматики.

4. В магистральных трубопроводах ГИТ вызывают значительное и длительное повышение отрицательного потенциала в системе защиты от электрохимической коррозии, что приводит к усилению коррозии трубопроводов и их преждевременному износу.

5. Зарубежные страны (США, Канада, Швеция, Норвегия, Финляндия), обладающие развитыми энергетическими и коммуникационными системами в авроральной зоне, где индуцированные электрические токи достигают максимальной интенсивности, уже давно знакомы с разрушающим воздействием этих токов. Серьезные нарушения и аварии в энергосистемах этих стран наблюдались в 1940, 1957–1958, 1960, 1967–1968, 1972, 1978 гг. Самый значительный ущерб был нанесен в 1989 г. (выход из строя всей энергетической системы провинции Квебек) и в 1991 г. (авария трансформаторов на АЭС). Аналогичные явления имели место и в ряде районов России.

6. В США и Канаде с 1968 г., а в Финляндии с 1977 г. проводятся систематические целевые исследования воздействия геометрических бурь на электрические коммуникационные системы: вы-

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Пономаренко И.С., Уссама Дакак.</b> Автоматизированный анализ послеаварийных режимов электроэнергетических систем . . . . .	
<b>Аронов М.А., Кокуркин М.П.</b> Энергетическая характеристика стойкости полимерной изоляции при воздействии частичных разрядов . . . . .	
<b>Чан Ки Фук.</b> Растекание зарядов, оседающих на поверхности газового включения в высоковольтном твердом диэлектрике . . . . .	
<b>Орлов А.В., Петухов В.С.</b> Определение электрической структуры облаков с помощью модели с объемным зарядом . . . . .	
<b>Унаров А.А.</b> Математическое обеспечение подсистемы оперативно-информационного управляющего комплекса для энергосистем . . . . .	
<b>Кулаковский В.Б., Надточий В.М., Зозулинский Е.Б.</b> Использование методологии экспертных систем для оценки состояния изоляции генераторов . . . . .	
<b>Мартынов А.А., Хрущев В.В.</b> Регулируемый многофазный источник питания . . . . .	
<b>Сагунов В.И.</b> Диагностирование кратных дефектов элементов автоматизированного электропривода . . . . .	
<b>Пенин А.А.</b> Определение отклонения от согласованного режима четырехполюсника Болюх В.Ф. Электромеханическое взаимодействие короткозамкнутого контура и криорезистивной обмотки, возбуждаемой от емкостного накопителя . . . . .	
<b>Зюссе Р., Димар У., Харниш Т.</b> Расчет и свойства фильтров с элементами высших порядков . . . . .	
<b>Казаков О.И.</b> Применение модифицированного билинейного метода диагностирования множественных отказов в линейных электрических цепях и системах . . . . .	
<b>Галка В.Л., Щигловский К.Б.</b> Модель распределения зарядов при заполнении резервуаров слабопроводящими жидкостями . . . . .	
<b>Артым А.Д., Филин В.А.</b> Матрично-топологические методы в задачах анализа процессов в электрических RLC-цепях . . . . .	
<b>ДИСКУССИИ</b>	
<b>Свидерская О.В., Свидерский В.Ф.</b> Выбор типа воздушной линии электропередачи по комплексному критерию . . . . .	
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
<b>Шнейберг Я.Л.</b> Изобретатель «русского света» (К 100-летию со дня смерти П.Н. Яблочкова) . . . . .	
<b>ХРОНИКА</b>	
<b>Шварц Я.М.</b> Влияние магнитно-ионосферных возмущений на функционирование технических средств . . . . .	
<b>Григорьев А.И.</b> Международная конференция «О природе феномена Хессдаленской долины» . . . . .	
<b>Бутырин П.А.</b> Научная сессия отделения физико-технических проблем энергетики РАН . . . . .	
<b>Царев Михаил Иванович</b> (К 85-летию со дня рождения) . . . . .	

## CONTENTS

<b>Ponomarenko I.S., Oussama Dakak.</b> Computer Aided Analysis of Post Fault Operating Conditions in Electrical Power Systems . . . . .	1
<b>Aronov M.A., Kokurkin M.P.</b> The Energy Characteristic of Polymer Insulation Stability under Partial Discharges . . . . .	5
<b>Tcan Ky Phuc.</b> Spread of Charge Lodged on the Surface of Gaseous Cavity in HV Solid Dielectric . . . . .	12
<b>Orlov A.V., Petukhov V.S.</b> Determination of a Cloud Electrical Structure on the Basis of a Space Charge Model . . . . .	14
<b>Unarov A.A.</b> One Version of Software in an Information Computational Subsystem of Information Operation Control Complex . . . . .	18
<b>Kulakovskii V.B., Nadtochii V.M., Zozulinskii Ye.B.</b> Expert System Technique Use for Evaluation of Generator Insulation Condition . . . . .	22
<b>Martynov A.A., Khrushchev V.V.</b> Controlled Multiphase Feed Source . . . . .	25
<b>Sagunov V.I.</b> Diagnosis of Multiple Defects of Automatic Electric Drive Elements . . . . .	29
<b>Penin A.A.</b> Definition of the Deviation from the Matched Four-Terminal Network Regime . . . . .	32
<b>Bolukh V.F.</b> Electromechanical Interaction of Short Circuit and Cryoresistive Winding Excited by Capacity Accumulator . . . . .	40
<b>Ziusse R., Dimar U., Harnish T.</b> Calculation and Features of Filters with Higher Order Elements . . . . .	46
<b>Kazakov O.I.</b> Application of the Modified Bilinear Method for the Diagnosis of Common-Mode Failures in Linear Electric Circuits and Systems . . . . .	50
<b>Galka V.L., Shchiglovskii R.B.</b> The Model of the Distribution of the Charges when Filling the Reservoirs with Low Conductive Liquids . . . . .	54
<b>Artym A.D., Filin V.A.</b> Matrix-Topological Methods for Transient Analysis in Electrical RLC-Circuits . . . . .	59
<b>DISCUSSION</b>	
<b>Sviderskaya O.V., Sviderskii V.F.</b> Choice of a Type of Power Transmission Air Line by a Complex Criterion . . . . .	64
<b>FROM THE HISTORY OF ELECTRICAL ENGINEERING</b>	
<b>Shneiberg YA.A.</b> The Inventor of «Russian Light» (on the 100-th Anniversary of P.N. Yablochkov's Death) . . . . .	67
<b>CHRONICLE</b>	
<b>Shwarts Ya.M.</b> The Influence of Magnetically Ionospherical Disturbances on the Functioning of the Hardware . . . . .	75
<b>Grigor'ev A.I.</b> International Conference «On the Nature of the Khessdalen Valley Phenomenon» . . . . .	76
<b>Butyrin P.A.</b> The Joint Scientific Session of the RAS Department of Physical Technical Power Engineering Problems and the Scientific Council «Scientific Foundations of Electrophysics and Electric Power Engineering» . . . . .	77
<b>Tsarev Mikhail Ivanovich</b> (to Mark the 85-th Anniversary of Birth) . . . . .	79

**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 27.06.94. Подписано в печать 28.07.94. Формат 60×881/8.  
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,8. Тираж 800 экз. Заказ 1465**

**Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10  
Макет выполнен АО «Знак», 115547, Москва, Михневский пр-д, 4**

**Типография № 9 комитета РФ по печати  
Москва, 109033, Волочаевская ул., 40**