

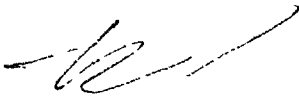
На правах рукописи

ВАСЬКОВСКАЯ Татьяна Александровна

ДИАГНОСТИКА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО ЧАСТЯМ

Специальность 05.09.05 - Теоретическая электротехника

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2003

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники» в Московском энергетическом институте (техническом университете).

Научный руководитель: чл.-корр. РАН, доктор  
технических наук  
**Бутырин Павел Анфимович.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Шакиров Мансур Акмелович**

кандидат технических наук, доцент  
**Волков Юрий Иванович**

Ведущая организация: **ОАО «Электростанция»**

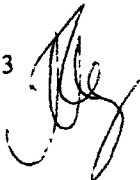
Защита состоится «24» октября 2003 г. в 16.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.157.13 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, ауд. 3-505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Ученый совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан «\_\_» сентября 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.157.13  
к.т.н., доцент



М. К. Чобану

2009-Н  
13765

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Под диагностикой электрических цепей понимается «определение неизвестных параметров электрической цепи при известных топологии цепи, части параметров цепи и ее реакции на различные воздействия» (ГОСТ Р5202-2003. Электротехника. Основные понятия.). Решение задачи диагностики цепей состоит из двух этапов – экспериментального этапа и расчетного этапа. На экспериментальном этапе происходит выбор, организация воздействий на цепь и измерение реакций цепи на эти воздействия. На расчетном этапе формируется математическая модель цепи, отвечающая целям ее диагностики, и осуществляется численная обработка этой модели для соответствующих данных измерений. Диагностика сравнительно новая для теории электрических цепей задача. Около 30 лет назад она была впервые формально поставлена в работах К.С. Демирчяна, Н.В. Киншта и были получены условия ее однозначной разрешимости. Затем была поставлена задача диагностики многополюсников в работах Л.М. Ройтмана, М.Н. Свами, П.А. Бутырина и исследованы условия ее разрешимости. В начале 80-х годов разрабатывались подходы к решению задач диагностики электрических цепей в условиях неполноты и/или противоречивости данных измерений в работах К.С. Демирчяна, П.А. Бутырина, затем – методы и проблемы решения задач диагностики применительно к конкретным электрическим цепям (Дж.У. Бэндлер, А.Э. Салама; М.Е. Алпатов, П.А. Бутырин). В настоящее время из-за массового старения электротехнического оборудования, ужесточения норм и требований к его эксплуатации задача диагностики электрических цепей является весьма важной задачей. В связи с дефицитом средств контроля за техническим состоянием оборудования актуальным становится повышение эффективности решения задач диагностики, разработка методов решения задачи диагностики по частям. Исследованию вопросов расчета электрических цепей по частям (диакоптика) посвящены работы Г. Крона, Х. Хэппа, В.Г. Миронова, М.А. Шакирова, О.Т. Гераскина и др.

**Целью работы** является разработка теоретических основ диагностики линейных электрических цепей по частям.

Достижение цели исследования предполагает решение следующих **основных задач:**

- разработка класса методов диагностики сложных линейных электрических цепей по частям;
- оценка эффективности разработанного класса методов диагностики линейных электрических цепей по критериям затрат на требуемые числа измерений, режимов, математических операций на обработку данных измерений;
- оценка точности решения задачи диагностики линейных электрических цепей по частям;
- анализ возможности применения разработанных методов диагностики для трехфазных цепей на примере диагностики параметров трехфазного трансформатора как одного из наиболее распространенных и ответственных элементов данного класса цепей.

ОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
С.Петербург 551  
09 100 акт

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использованы методы теории электрических цепей, теории матриц, линейной алгебры, интервального анализа и математического моделирования.

**Научная новизна основных результатов диссертационной работы.** Научная новизна работы заключается в том, что впервые поставлена и решена задача систематического исследования возможностей диагностирования электрических цепей по частям, в рамках которой разработан целый класс эффективных методов такого диагностирования.

**Конкретное личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.**

Все результаты диссертационной работы получены лично автором. П.А. Бутырину, в соавторстве с которым опубликовано 5 работ, М.Е. Алпатову, в соавторстве с которым опубликована 1 работа, принадлежит постановка соответствующих задач.

**Практическая значимость основных результатов диссертационной работы:**

- реализация разработанных методов диагностики линейных электрических цепей по частям позволяет резко сократить требуемое число измерений, измерительных приборов, рассматриваемых режимов, вычислительных операций и одновременно повысить точность решения задачи диагностики;

- разработанные упрощенные математические модели трехфазных трансформаторов позволяют проводить диагностику последних под нагрузкой по данным измерений только режимных параметров – токов и напряжений

**Реализация результатов работы.** Работа выполнялась в соответствии с хозяйственным договором № 2431000. Работа поддержана грантами РФФИ № 00-15-96556 и Президента РФ НШ-1511.2003.8.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Шестой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (Москва, МЭИ, 2000);

- IV Международной конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (Москва, 2000);

- V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2001);

- Международной научно-практической конференции «Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России» (Санкт-Петербург, 2002).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы отражено в 12 печатных работах, в том числе опубликованных в журналах академии наук РФ «Электричество» [1, 7], «Известия РАН. Энергетика» [3].

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, содержащего 63 наименования. Текстовая часть изложена на 185 страницах (рисунков 42, таблиц 2).

В приложении на 3 страницах размещаются документы, подтверждающие:

- внедрение (акт ОАО ХК «Электростанция» г. Москва)
- научное признание этих результатов (наградные документы на медали Минобразования РФ и Российской академии наук за лучшие студенческие научные работы).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, дается общая характеристика работы, формулируются цели и задачи исследований.

Первая глава посвящена разработке методов диагностики сложных линейных электрических цепей по частям в базисах узловых напряжений, контурных токов и в гибридном базисе.

Одним из наиболее известных методов диагностики электрических цепей в базисе узловых напряжений является метод узловых сопротивлений. Он предполагает, что в цепи доступны все узлы для подключения источников и измерения напряжений. Согласно этому методу последовательно между каждым из узлов цепи и базисным узлом включается единичный источник тока, затем по данным  $n$  диагностических экспериментов и  $n^2$  измерений формируется матрица узловых сопротивлений  $Z_y$ . Тогда матрица узловых проводимостей  $Y_y$ , по которой можно восстановить проводимости всех ветвей, определяется как обратная матрица к матрице  $Z_y$ :

$$Y_y = Z_y^{-1}, Z_y = Y_y^{-1}. \quad (1.1)$$

С ростом размерности диагностируемой электрической цепи возрастает трудоемкость реализации метода узловых сопротивлений. Предложено использовать известную структуру расположения ненулевых элементов матрицы  $Y_y$ , чтобы ограничиться нахождением не всех элементов матрицы  $Z_y$ , а только тех, которые находятся на идентичных ненулевым элементам матрицы  $Y_y$  местам [1, 2, 12].

Разобьем некоторую сложную цепь на  $N$  подцепей. Присвоим внутренним узлам  $j$ -ой подцепи,  $j = \overline{1, N}$  номера  $m_{j-1}+1, m_{j-1}+2, \dots, m_{j-1} + n_j$ , где  $m_{j-1} = \sum_{k=1}^{j-1} n_k$  – суммарное число узлов первых  $j-1$  подцепей,  $n_j$  – число внутренних узлов  $j$ -ой подцепи, а граничным узлам – номера  $m_N+1, m_N+2, \dots, m_N+n_r = m$ , где  $n_r$  – число граничных узлов. Тогда матрица узловых проводимостей будет иметь блочно-диагональный с окаймлением вид

$$Y_y = \begin{array}{c} n_1 \{ \\ n_j \{ \\ n_N \{ \\ n_r \{ \end{array} \left[ \begin{array}{cccc} \boxed{Y_{y1}} & & & \boxed{Y_{y1r}} \\ & \ddots & & \vdots \\ & & \boxed{Y_{yj}} & \boxed{Y_{yjr}} \\ & 0 & & \vdots \\ & & & \boxed{Y_{yN}} & \boxed{Y_{yNr}} \\ \underbrace{\boxed{Y_{yr1}} \dots \boxed{Y_{y\eta}} \dots}_{n_1} & \dots & \underbrace{\boxed{Y_{y\eta}} \dots \boxed{Y_{y\tau N}}}_{n_j} & \underbrace{\boxed{Y_{y\tau N}} \boxed{Y_{yr}}}_{n_r} \end{array} \right] \quad (1.2)$$

Восстановление матрицы узловых проводимостей возможно по отдельным блокам матрицы узловых сопротивлений, соответствующим ненулевым блокам искомой матрицы:

$$U_y = Z_y = \begin{array}{c} n_1 \{ \\ n_j \{ \\ n_N \{ \\ n_r \{ \end{array} \left[ \begin{array}{cccc} \boxed{Z_{y1}} & & & \boxed{Z_{yjr}} \\ & \ddots & & \vdots \\ & & \boxed{Z_{yj}} & \boxed{Z_{yjr}} \\ & & & \vdots \\ & & & \boxed{Z_{yN}} & \boxed{Z_{yNr}} \\ \underbrace{\boxed{Z_{yr1}} \dots \boxed{Z_{y\eta}} \dots}_{n_1} & \dots & \underbrace{\boxed{Z_{y\eta}} \dots \boxed{Z_{y\tau N}}}_{n_j} & \underbrace{\boxed{Z_{y\tau N}} \boxed{Z_{yr}}}_{n_r} \end{array} \right] \quad (1.3)$$

Восстановление матрицы узловых проводимостей проводится по формулам:

$$\begin{aligned} Y_{yj} &= (Z_{yj} - Z_{yjr} Z_{yr}^{-1} Z_{y\eta})^{-1}, \quad Y_{yjr} = -Y_{yj} Z_{yjr} Z_{yr}^{-1}, \\ Y_{y\eta} &= -Z_{yr}^{-1} Z_{y\eta} Y_{yj}, \quad Y_{yr} = \left( 1 - \sum_{j=1}^N Y_{y\eta} Z_{yjr} \right) Z_{yr}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Получены формулы для восстановления матрицы узловых проводимостей по частям на основе обобщенного метода узловых сопротивлений, когда матрица задающих токов не является единичной:

$$Y_y = J_y U_y^{-1}. \quad (1.5)$$

Условное разбиение цепи на подцепи позволяет представить матрицу узловых проводимостей в блочно-диагональном с окаймлением виде и восстанавливать ее ненулевые блоки по выделенным блокам матриц узловых напряжений и задающих токов [3, 7, 12]:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline \boxed{Y_{l1}} & 0 & \boxed{Y_{lr}} \\ \hline \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline 0 & \boxed{Y_{N}} & \boxed{Y_{Nr}} \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline \boxed{Y_{rl}} & \dots & \boxed{Y_r} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \boxed{U_{l1}} & \dots & \boxed{U_{lr}} \\ \hline \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline \boxed{U_{N}} & \dots & \boxed{U_{Nr}} \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline \boxed{U_{rl}} & \dots & \boxed{U_r} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \boxed{J_{l1}} & \dots & \boxed{J_{lr}} \\ \hline \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline \boxed{J_N} & \dots & \boxed{J_{Nr}} \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline \boxed{J_c} & & \\ \hline \end{array}$$

$$Y_i = (J_i - J_{ir} U_i^{-1} U_{ir}) (U_i - U_{ir} U_r^{-1} U_{ri})^{-1}, \quad Y_{ir} = (J_{ir} - Y_i U_{ir}) U_r^{-1}, \quad (1.6)$$

$$Y_{ri} = Y_{ir}^t, \quad i = \overline{1, N}, \quad Y_r = \left( J_r - \sum_{i=1}^N Y_{ri} U_{ri} \right) U_r^{-1}.$$

Предложенный метод позволяет определять параметры отдельных подцепей без учета активных воздействий на другие подцепи.

Дуальным по отношению к методу узловых сопротивлений является метод контурных проводимостей. Он предполагает, что в цепи доступны ветви для подключения источников и измерения токов. Согласно этому методу при воздействии на контуры единичных источников э.д.с. по данным измерений контурных токов формируется матрица контурных проводимостей  $Z_z$ , а матрица контурных сопротивлений  $Z_z$  определяется как обратная ей:

$$Z_z = Y_z^{-1}, \quad Y_z = I_z. \quad (1.7)$$

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline \boxed{Z_{z11}} & 0 & \boxed{Z_{z1r}} \\ \hline \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline 0 & \boxed{Z_{zNN}} & \boxed{Z_{zNr}} \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline \boxed{Z_{zr1}} & \dots & \boxed{Z_{zr}} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \boxed{Y_{z11}} & \dots & \boxed{Y_{z1r}} \\ \hline \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline \boxed{Y_{zNN}} & \dots & \boxed{Y_{zNr}} \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline \boxed{Y_{zr1}} & \dots & \boxed{Y_{zr}} \\ \hline \end{array} = 1 \quad (1.8)$$

Восстановление искомой матрицы  $Z_z$  производится по формулам [7, 12]

$$\begin{aligned} Z_{zj} &= [Y_{zj} - Y_{zjr} Y_{zr}^{-1} Y_{zrj}]^{-1}, \quad Z_{zjr} = -Z_{zj} Y_{zjr} Y_{zr}^{-1}, \\ Z_{zrj} &= -Y_{zr}^{-1} Y_{zrj} Z_{zj}, \quad Z_{zr} = \left( 1 - \sum_{j=1}^N Z_{zrj} Y_{zjr} \right) Y_{zr}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Диагностику электрических цепей можно проводить в базисе контурных токов с помощью обобщенного метода контурных проводимостей. В этом методе в контурах цепи действуют э.д.с., значения которых меняются от режима к режиму, а матрица задающих токов  $I_z$  уже не будет единичной как в рассмотренном выше методе контурных токов. При этом для вычисления матрицы  $Z_z$  необходимо измерить  $2m^2$  токов контуров и э.д.с. источников в  $m$  независимых опытах [4, 7, 12]:

$$Z_z = E_z I_z^{-1}, \quad (1.10)$$

или

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline \boxed{Z_{z11}} & 0 & \boxed{Z_{z1r}} \\ \hline \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline 0 & \boxed{Z_{zNN}} & \boxed{Z_{zNr}} \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline \boxed{Z_{zr1}} & \dots & \boxed{Z_{zr}} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \boxed{I_{z11}} & \dots & \boxed{I_{z1r}} \\ \hline \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline \boxed{I_{zNN}} & \dots & \boxed{I_{zNr}} \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline \boxed{I_{zr1}} & \dots & \boxed{I_{zr}} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \boxed{E_{z11}} & \dots & \boxed{E_{z1r}} \\ \hline \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline \boxed{E_{zNN}} & \dots & \boxed{E_{zNr}} \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline \boxed{E_{zr1}} & \dots & \boxed{E_{zr}} \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{aligned} Z_{zj} &= (E_{zj} - E_{zjr} I_{zr}^{-1} I_{zrj}) (I_{zj} - I_{zjr} I_{zr}^{-1} I_{zrj})^{-1}, \\ Z_{zjr} &= (E_{zjr} - Z_{zj} I_{zjr}) I_{zr}^{-1}, \\ Z_{zrj} &= Z_{zjr}^t, \quad Z_{zr} = \left( E_{zr} - \sum_{j=1}^N Z_{zrj} I_{zjr} \right) I_{zr}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Число требуемых независимых экспериментов и измерений для диагностики по частям методами узловых сопротивлений и контурных проводимостей составляет соответственно  $n$  и  $n^2 - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N n_i n_j$ .

Предложено также параллельное определение параметров подцепей электрических цепей при одновременном воздействии источниками тока или ЭДС на все подцепи сразу и измерении их реакций (токов или напряжений). Это позволяет сократить не только число измерений токов и напряжений, но и уменьшить число рассматриваемых режимов до  $n_r + \max(n_1, \dots, n_N)$ .

Условное разделение электрической цепи на  $y$  и  $z$ -подцепи позволяет использовать для решения задачи ее диагностики метод смешанных величин. Он предполагает, что у части ветвей (относимых к  $y$ -ветвям) для измерений напряжений и подключения источников доступны узлы, а у другой части ветвей (относимых к  $z$ -ветвям) для измерений токов и подключения источников доступны ветви. Уравнения согласно методу смешанных величин имеют вид:

$$\begin{matrix} n \{ \\ m \{ \end{matrix} \begin{array}{|c|c|} \hline \overbrace{n} \\ \hline Y_y & H_{yz} \\ \hline -H_{yz}^t & Z_z \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline U_y \\ \hline I_z \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline J_y \\ \hline E_z \\ \hline \end{array}. \quad (1.12)$$

Тогда в случае диагностирования сложных электрических цепей разделение на  $y$  и  $z$  подцепи целесообразно проводить так, чтобы  $z$ -подцепь части  $y$ -подцепи несвязными и наоборот. При этом матрицы  $Y_y$  и  $Z_z$  общей гибридной матрицы примут блочно-диагональный вид [5, 6, 12]. Математическая модель примет следующий вид:

$$\begin{matrix} n_1 \{ \\ \vdots \\ n_N \{ \end{matrix} \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_{y1} & 0 & \\ \hline & \ddots & \\ \hline 0 & & Y_{yN} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline & & H_{yz} \\ \hline & & \\ \hline Z_{z1} & & 0 \\ \hline & & \ddots \\ \hline 0 & & Z_{zM} \\ \hline \end{array} \left. \begin{array}{l} \} m_1 \\ \vdots \\ \} m_M \end{array} \right\} \begin{array}{|c|} \hline U_y \\ \hline I_z \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline J_y \\ \hline E_z \\ \hline \end{array},$$

а ее обработка дает следующее решение рассматриваемой задачи:

$$\begin{aligned} Y_i &= (J_i - H_{yzi} I_i) U_i^{-1}, \quad i = \overline{1, N_y}, \\ Z_j &= (E_j + H_{yzj}^t U_j) I_j^{-1}, \quad j = \overline{1, N_z}, \end{aligned} \quad (1.13)$$

Здесь подматрицы  $J_{y_i}$ ,  $H_{yzi}$ ,  $I_{z_i}$ ,  $U_{y_i}$ ,  $E_{z_j}$ ,  $H_{yzj}^t$ ,  $U_{y_j}$ ,  $I_{z_j}$  есть необходимые для вычисления блоков  $Y_{y_i}$ ,  $Z_{z_j}$  составляющие полных матриц, которые формируются по данным достаточного числа независимых экспериментов. Число



требуемых независимых экспериментов и измерений для диагностики по частям в методе смешанных величин составляет соответственно  $\max(n_1, \dots, n_N, m_1, \dots, m_M)$  и  $\max(n_1, \dots, n_N, m_1, \dots, m_M)(n+m)$ .

**Вторая глава** посвящена исследованию предельных случаев декомпозиции цепей на подцепи, разработка методов диагностики цепей по частям, основанных на диагностике элементарных подцепей [7-9, 12].

Элементарными подцепями в базисах узловых напряжений и контурных токов соответственно выступают звезды и контуры. Диагностика электрических цепей, условно разбитых на элементарные подцепи, позволяет исключить экспериментальное определение всех элементов матриц узловых сопротивлений и контурных проводимостей, находящихся на местах, идентичных местам расположения нулевых элементов матриц узловых проводимостей и контурных сопротивлений.

Предложены методы «звезд» и «контуров», согласно которым проводимости и сопротивления всех ветвей определяются последовательно звезда за звездой и контур за контуром. Предложена и исследована также и одновременная диагностика всех звезд и контуров.

Диагностика электрической цепи, проводимая методом «звезд» или «контуров», требует пропорционального числу узлов или контуров в цепи числа измерений (а не его квадрату), т.е. резко снижает трудоемкость их диагностики.

Предложенные ранее методы определения параметров отдельных звезд и контуров, хотя и эффективны в реализации, но достаточно сложны в описании, т.к. основаны на блочно-матричном представлении уравнений, кроме того, сложны алгоритмически из-за, например, необходимости выбора базисного узла.

Предложены методы определения параметров ветвей звезды и контура в базисах напряжений и токов ветвей. Рассмотрим звезду с источником тока, управляемым напряжением и током (рис. 1).

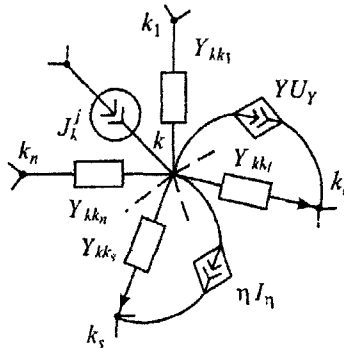


Рис. 1

Уравнение первого закона Кирхгофа такой звезды, записанное во взаимной форме, в базисе напряжений ветвей для некоторого  $j$ -го режима имеет вид

$$\begin{aligned} & \left[ U_{kk_1}^j \dots U_{kk_1}^j \dots U_{kk_s}^j \dots U_{kk_n}^j U_Y^j I_\eta^j \right] \times \\ & \times \left[ Y_{kk_1} \dots Y_{kk_1} \dots Y_{kk_s} \dots Y_{kk_n} Y \eta \right]^t = J_k^j \end{aligned} \quad (2.1)$$

Рассмотрев  $n+2$  независимых режимов, можно получить систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} U_{kk_1}^1 & \dots & U_{kk_1}^1 & \dots & U_{kk_s}^1 & \dots & U_{kk_n}^1 & U_{pq}^1 & I_r^1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{kk_1}^{n+2} & \dots & U_{kk_1}^{n+2} & \dots & U_{kk_s}^{n+2} & \dots & U_{kk_n}^{n+2} & U_{pq}^{n+2} & I_r^{n+2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{kk_1} \\ \vdots \\ Y_{kk_1} \\ \vdots \\ Y_{kk_s} \\ \vdots \\ Y_{kk_n} \\ Y \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_k^1 \\ \vdots \\ J_k^{n+2} \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

решение которой даст искомые проводимости звезды. Рассмотрен случай звезды, ветви которой содержат источник напряжения, управляемый током и напряжением.

Предложен дуальный рассмотренному методу определения параметров звезды метод определения параметров контура в базисе токов ветвей, согласно которому находятся сопротивления ветвей отдельных контуров цепи. Для определения сопротивлений и коэффициентов управления зависимых источников энергии некоторого контура (рис. 2) проводятся измерения  $m+3$  независимых режимов последней.

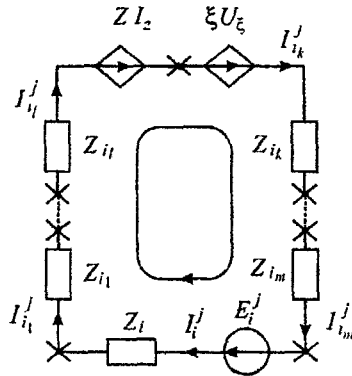


Рис. 2

Уравнения второго закона Кирхгофа во взаимной форме записи для каждого из этих режимов будут иметь вид:

$$\begin{aligned} & \left[ I_i^j \ I_{i_1}^j \ \dots \ I_{i_j}^j \ I_{i_k}^j \ \dots \ I_{i_m}^j \ -U_{\xi}^j \ -I_R^j \right] \times \\ & \times \left[ Z_i \ Z_{i_1} \ \dots \ Z_{i_j} \ Z_{i_k} \ \dots \ Z_{i_m} \ Z \ \eta \right]^T = E_i^j. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Тогда искомые параметры контура можно найти после формирования следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} I_i^1 & I_{i_1}^1 & \dots & I_{i_j}^1 & I_{i_k}^1 & \dots & I_{i_m}^1 & -U_{\xi}^1 & -I_R^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_i^{m+3} & I_{i_1}^{m+3} & \dots & I_{i_j}^{m+3} & I_{i_k}^{m+3} & \dots & I_{i_m}^{m+3} & -U_{\xi}^{m+3} & -I_R^{m+3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_i \\ Z_{i_1} \\ \vdots \\ Z_{i_j} \\ Z_{i_k} \\ \vdots \\ Z_{i_m} \\ Z \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i^1 \\ \vdots \\ E_i^{m+3} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Рассмотрен случай контура, ветви которого содержат источник тока, управляемый током и напряжением.

Предложены методы «связи-дерево» и «дерево-связи». Метод «связи-дерево» заключается в первоначальном экспериментальном определении всех параметров ветвей дополнений дерева в базисе узловых напряжений или в базисе напряжений ветвей и последующем проведении одного эксперимента, в процессе которого определяются как контурные токи (токи в связях), так и оставшиеся неизвестные параметры цепи.

**Пример 2.1** [7, 12]. Пусть диагностируется цепь, схема которой изображенная на рис. 3. Согласно описанному методу необходимо провести три опыта. Для нахождения параметров ветвей связей определим методом звезд параметры 1-ой и 2-ой звезд. Обеспечивая независимость режимов исследуемых подцепей (звезд), рассмотрим следующие режимы.

I. Единичный ток задается из узла 7 в узел 1.

II. Единичный ток задается из узла 3 в узел 2.

III. Единичный ток задается из узла 4 в узел 6. В результате проведенных измерений мы располагаем следующими данными:

I.  $U_{12} = 1,296 \text{ В}$ ,  $U_{13} = 0,081 \text{ В}$ ,  $U_{14} = 0,274 \text{ В}$ ,  $U_{26} = 0,347 \text{ В}$ ,  $U_{27} = 0,813 \text{ В}$ .

II.  $U_{12} = -1,296 \text{ В}$ ,  $U_{13} = 1,246 \text{ В}$ ,  $U_{14} = 0,237 \text{ В}$ ,  $U_{26} = 0,168 \text{ В}$ ,  $U_{27} = 0,081 \text{ В}$ ,

$U_{54} = 1,05 \text{ В}$ . III.  $U_{12} = -1,025 \text{ В}$ ,  $U_{13} = 0,34 \text{ В}$ ,  $U_{14} = 1,156 \text{ В}$ .

Определим проводимости выделенных звезд:

$$\begin{bmatrix} G_{12} \\ G_{13} \\ G_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{12}^I & U_{13}^I & U_{14}^I \\ U_{12}^{II} & U_{13}^{II} & U_{14}^{II} \\ U_{12}^{III} & U_{13}^{III} & U_{14}^{III} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} J_1^I \\ J_1^{II} \\ J_1^{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,296 & 0,081 & 0,274 \\ -1,296 & 1,246 & 0,237 \\ -1,025 & 0,340 & 1,156 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,650 \\ 0,600 \\ 0,400 \end{bmatrix} \text{ См.},$$

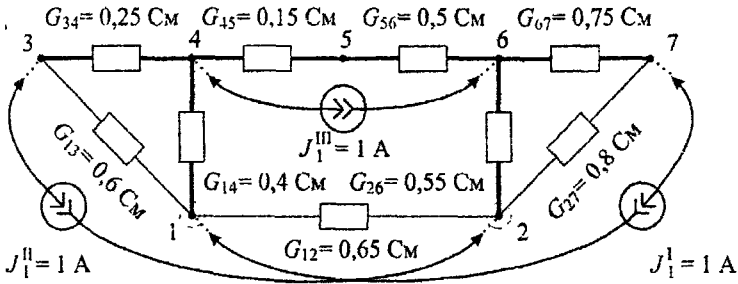


Рис. 3

$$\begin{bmatrix} G_{26} \\ G_{27} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{26}^I & U_{27}^I \\ U_{26}^{II} & U_{27}^{II} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} J_2^I - G_{12}U_{21}^I \\ J_2^{II} - G_{12}U_{21}^{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,552 \\ 0,801 \end{bmatrix} \text{ CM}.$$

Определим проводимости оставшихся ветвей дерева:

$$G_{34} = \frac{G_{13}U_{13}^{II} - J_3^{II}}{U_{34}^{II}} = \frac{0,600 \cdot 1,246 - 1}{0,237 - 1,246} = 0,250 \text{ CM}, \quad G_{67} = \frac{G_{27}U_{27}^{II}}{U_{76}^{II}} = 0,746 \text{ CM}$$

$$G_{45} = \frac{G_{34}U_{34}^{II} + G_{14}U_{14}^{II}}{U_{45}^{II}} = 0,150 \text{ CM}, \quad G_{56} = \frac{G_{45}U_{45}^{II}}{U_{56}^{II}} = 0,500 \text{ CM}.$$

Таким образом, диагностирование данной цепи требует проведения 3-х экспериментов и измерения 14 напряжений ветвей вместо проведения 6 экспериментов и измерения 36 напряжений методом узловых сопротивлений.

Метод «дерево-связи» заключается в первоначальном экспериментальном определении всех параметров ветвей дерева в базе контурных токов или в базе токов ветвей и последующем определении напряжений всех ветвей и оставшихся неизвестных параметров цепи.

Третья глава посвящена оценке точности решения задачи диагностики на основе матричных норм и метода интервального анализа [6, 7]. Рассматривается новая методика диагностики цепей, описываемых плохо обусловленной системой алгебраических уравнений.

Точность решения задачи диагностики  $J$ -й подцепи в базе узловых напряжений удовлетворяет неравенству

$$\delta_{Y^3, Y} \leq \frac{\alpha_{U^3, Y}}{1 - \alpha_{U^3, Y} \delta_{U^3, Y}} (\delta_{U^3, Y} + \delta_{J^3, Y}). \quad (3.1)$$

где  $\delta_{Y^3, Y} = \frac{\|\Delta Y^3_{, Y}\|}{\|Y^3_{, Y}\|}$  — относительная погрешность решения задачи диаг-

ности,  $\delta_{U^3, Y} = \frac{\|\Delta U^3_{, Y}\|}{\|U^3_{, Y}\|}$ ,  $\delta_{J^3, Y} = \frac{\|\Delta J^3_{, Y}\|}{\|J^3_{, Y}\|}$  — относительная погрешность задания

матриц воздействий  $J^{\circ}_{yj}$  и снятия реакций  $U^{\circ}_{yj}$ ,  $\alpha_{U^{\circ}_{yj}}$  — число обусловленности матрицы  $U^{\circ}_{yj}$ , а  $\|\cdot\|$  — мультипликативная матричная норма. Верхний индекс  $\circ$  обозначает принадлежность матриц эквивалентному многополюснику  $j$ -й подцепи, которым заменили цепь. Относительная погрешность определения матрицы узловых проводимостей эквивалентного многополюсника тем больше, чем больше величины, характеризующие относительную точность задания матриц  $U^{\circ}_{yj}$  и  $J^{\circ}_{yj}$ , и число обусловленности матрицы  $U^{\circ}_{yj}$ .

Рассматривается оценка точности определения каждого элемента матрицы узловых проводимостей эквивалентного многополюсника в отдельности, получаемая с помощью метода интервального анализа.

Разбираются особенности оценки точности при диагностике электрических цепей по частям различными методами.

Показывается, что точность решения задачи диагностики электрических цепей при их условном разбиении на части увеличивается.

Точность определения параметров электрических цепей связана со структурно-топологическими особенностями цепей, которые в базисе узловых напряжений характеризуются числом обусловленности матрицы узловых проводимостей цепи. К таким особенностям относится наличие почти особых разрезов из проводимостей, значения которых существенно меньше значений остальных проводимостей подцепи. Число обусловленности матрицы узловых проводимостей (узловых сопротивлений) цепей с почти особыми разрезами достаточно велико. Погрешность решения задачи диагностики цепи, содержащей почти особые разрезы также весьма велика. Электрические цепи, содержащие почти особые разрезы целесообразно диагностировать по частям, естественным образом разделенных почти особыми разрезами. Условно приняв, что ветви, относящиеся к почти особым разрезам, обладают нулевыми проводимостями, можно определять проводимости оставшихся ветвей двух или более образцованных цепей. Иначе говоря, плохо обусловленная матрица узловых проводимостей цепей, содержащих почти особые разрезы, рассматривается как вырожденная. Проводимости ветвей почти особого разреза определяются по полученным данным диагностики подцепей и данным одного эксперимента методом «связи-дерево».

Процедура выявления почти особых разрезов и соответствующей им декомпозиции цепи связывается с грубой предварительной оценкой входных сопротивлений. В этом случае вначале выбирается некоторый узел  $i_1$  и последовательно измеряются входные сопротивления  $R_{ij}$  между ним и остальными узлами  $j = \overline{1, m}$ ,  $j \neq i_1$  цепи. Если сопротивления  $R_{ij}$  меньше наперед заданной величины  $\epsilon$ , то соответствующий узел  $j$  относят к подцепи 1. Из числа всех узлов, сопротивления  $R_{ij}$  которых больше этой заданной величины  $\epsilon$ , выбирается узел  $i_2$ , процедура повторяется и формируется подцепь 2. Рекурсивное повторение процедуры до ее исчерпания позволяет получить представление о топо-

логических особенностях цепи, выделяя подцепи, разделенные почти особыми разрезами.

Четвертая глава посвящена исследованию упрощенных математических и диагностических моделей трехфазных трансформаторов. Математическая модель разрабатывается для установившегося синусоидального режима и ненасыщенной магнитной системы [10, 11].

Трехфазный трансформатор как элемент электрической цепи описывается уравнениями состояния, связывающими токи и напряжения на его входах и выходах, например, уравнениями в  $Z$ ,  $Y$  и  $H$  параметрах.

Задача диагностики трехфазного трансформатора состоит в нахождении матриц  $Z$ ,  $Y$ ,  $H$  по заданным воздействиям и снятым реакциям на эти воздействия. Главной проблемой как расчетной, так и экспериментальной части диагностики является проблема размерности. Определение бхб полностью заполненных матриц описания трехфазного трансформатора возможно после проведения шести независимых опытов, которые невозможно выполнить при функциональной диагностике во время работы трехфазного трансформатора под нагрузкой.

Получены упрощенные математические модели трехфазных трансформаторов, позволяющие эффективно решать рассматриваемую задачу диагностики. При формировании математических моделей трансформаторов в  $Z$  и  $Y$  параметрах плохо обусловленные матрицы  $Z$  и  $Y$  заменяются вырожденными матрицами:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \\ \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{c|c} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{11}\underline{K}_u \\ \hline \underline{K}_u\underline{Z}_{11} & \underline{K}_u\underline{Z}_{11}\underline{K}_u \end{array} \right] \begin{bmatrix} \underline{I}_C \\ \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix}, \text{ где } \underline{K}_u = \underline{Z}_{11}^{-1}\underline{Z}_{12},$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \\ \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{c|c} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{11}\underline{K}_i \\ \hline \underline{K}_i\underline{Y}_{11} & \underline{K}_i\underline{Y}_{11}\underline{K}_i \end{array} \right] \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \\ \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix}, \text{ где } \underline{K}_i = \underline{Y}_{11}^{-1}\underline{Y}_{12}.$$

Здесь индексы 1 и впоследствии индексы 2 показывают соответственно первичную и вторичную обмотки.

Предложена упрощенная математическая модель трехфазных трансформаторов и при использовании  $H$  параметров:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \\ \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{Z}_{11K3} & \mathbf{K}_u \\ \hline -\mathbf{K}_1 & \mathbf{Y}_{22XX} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \\ \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix}$$

Здесь матрицы  $\mathbf{Z}_{11K3}$  и  $\mathbf{Y}_{22XX}$  характеризуют соответственно входные сопротивления и проводимости со стороны соответствующих обмоток в режимах короткого замыкания и холостого хода. Они имеют следующую связь с блоками матриц  $\mathbf{Z}$  и  $\mathbf{Y}$ :

$$\mathbf{Z}_{11K3} = \mathbf{Z}_{11} - \mathbf{Z}_{12} \mathbf{Z}_{22}^{-1} \mathbf{Z}_{21},$$

$$\mathbf{Y}_{22XX} = \mathbf{Y}_{22} - \mathbf{Y}_{21} \mathbf{Y}_{11}^{-1} \mathbf{Y}_{12}.$$

Рассмотрение трех независимых режимов позволяет построить общие упрощенные диагностические модели в  $\mathbf{Z}$  параметрах:

$$\mathbf{Z}_{11} = \begin{bmatrix} \underline{U}_A^1 & \underline{U}_A^2 & \underline{U}_A^3 \\ \underline{U}_B^1 & \underline{U}_B^2 & \underline{U}_B^3 \\ \underline{U}_C^1 & \underline{U}_C^2 & \underline{U}_C^3 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \underline{I}_a^1 & \underline{I}_a^2 & \underline{I}_a^3 \\ \underline{I}_b^1 & \underline{I}_b^2 & \underline{I}_b^3 \\ \underline{I}_c^1 & \underline{I}_c^2 & \underline{I}_c^3 \end{bmatrix} + \mathbf{K}_u \begin{bmatrix} \underline{I}_A^1 & \underline{I}_A^2 & \underline{I}_A^3 \\ \underline{I}_B^1 & \underline{I}_B^2 & \underline{I}_B^3 \\ \underline{I}_C^1 & \underline{I}_C^2 & \underline{I}_C^3 \end{bmatrix} \right)^{-1},$$

в  $\mathbf{Y}$  параметрах:

$$\mathbf{Y}_{11} = \begin{bmatrix} \underline{I}_A^1 & \underline{I}_A^2 & \underline{I}_A^3 \\ \underline{I}_B^1 & \underline{I}_B^2 & \underline{I}_B^3 \\ \underline{I}_C^1 & \underline{I}_C^2 & \underline{I}_C^3 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \underline{U}_A^1 & \underline{U}_A^2 & \underline{U}_A^3 \\ \underline{U}_B^1 & \underline{U}_B^2 & \underline{U}_B^3 \\ \underline{U}_C^1 & \underline{U}_C^2 & \underline{U}_C^3 \end{bmatrix} - \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 & \underline{U}_a^2 & \underline{U}_a^3 \\ \underline{U}_b^1 & \underline{U}_b^2 & \underline{U}_b^3 \\ \underline{U}_c^1 & \underline{U}_c^2 & \underline{U}_c^3 \end{bmatrix} \right)^{-1},$$

в  $\mathbf{H}$  параметрах:

$$\mathbf{Z}_{11K3} = \left( \begin{bmatrix} \underline{U}_A^1 & \underline{U}_A^2 & \underline{U}_A^3 \\ \underline{U}_B^1 & \underline{U}_B^2 & \underline{U}_B^3 \\ \underline{U}_C^1 & \underline{U}_C^2 & \underline{U}_C^3 \end{bmatrix} - \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 & \underline{U}_a^2 & \underline{U}_a^3 \\ \underline{U}_b^1 & \underline{U}_b^2 & \underline{U}_b^3 \\ \underline{U}_c^1 & \underline{U}_c^2 & \underline{U}_c^3 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \underline{I}_A^1 & \underline{I}_A^2 & \underline{I}_A^3 \\ \underline{I}_B^1 & \underline{I}_B^2 & \underline{I}_B^3 \\ \underline{I}_C^1 & \underline{I}_C^2 & \underline{I}_C^3 \end{bmatrix}^{-1},$$

$$\text{и } \mathbf{Y}_{22XX} = \left( \begin{bmatrix} \underline{I}_a^1 & \underline{I}_a^2 & \underline{I}_a^3 \\ \underline{I}_b^1 & \underline{I}_b^2 & \underline{I}_b^3 \\ \underline{I}_c^1 & \underline{I}_c^2 & \underline{I}_c^3 \end{bmatrix} + \mathbf{K}_u \begin{bmatrix} \underline{I}_A^1 & \underline{I}_A^2 & \underline{I}_A^3 \\ \underline{I}_B^1 & \underline{I}_B^2 & \underline{I}_B^3 \\ \underline{I}_C^1 & \underline{I}_C^2 & \underline{I}_C^3 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 & \underline{U}_a^2 & \underline{U}_a^3 \\ \underline{U}_b^1 & \underline{U}_b^2 & \underline{U}_b^3 \\ \underline{U}_c^1 & \underline{U}_c^2 & \underline{U}_c^3 \end{bmatrix}^{-1}.$$

Разбираются особенности использования упрощенных математических моделей для трансформаторов в конкретном соединении обмоток.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны теоретические основы проведения диагностики сложных линейных электрических цепей по частям. Разработаны методы диагностики цепей большой размерности по частям с использованием узлового, контурного и гибридного базисов описания цепи.

2. Разработаны методы диагностики, основанные на определении параметров предельно малых – элементарных подцепей с использованием базисов напряжений и токов. Показано, что последовательное или параллельное использование процедур диагностики элементарных подцепей, а также их сочетание, позволяет сократить число измерений до числа соизмеримого с числом неизвестных параметров диагностируемой цепи.

3. Показана высокая эффективность разработанных методов диагностики цепей по частям, которая проявляется в резком сокращении чисел требуемых измерений, измерительных приборов, вычислений, рассматриваемых приборов по сравнению с соответствующими числами диагностики этих цепей без разбивки их на частям.

4. Получена оценка точности решения задачи диагностики сложных электрических цепей по частям. Показано, что использование методов диагностики электрических цепей по частям дает более высокую точность решения задачи диагностики.

5. Предложена упрощенная диагностическая математическая модель трехфазного трансформатора, получены упрощенные диагностические модели трансформаторов с различным соединением обмоток, позволяющие эффективно решать соответствующие задачи диагностики параметров трансформаторов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих источниках:

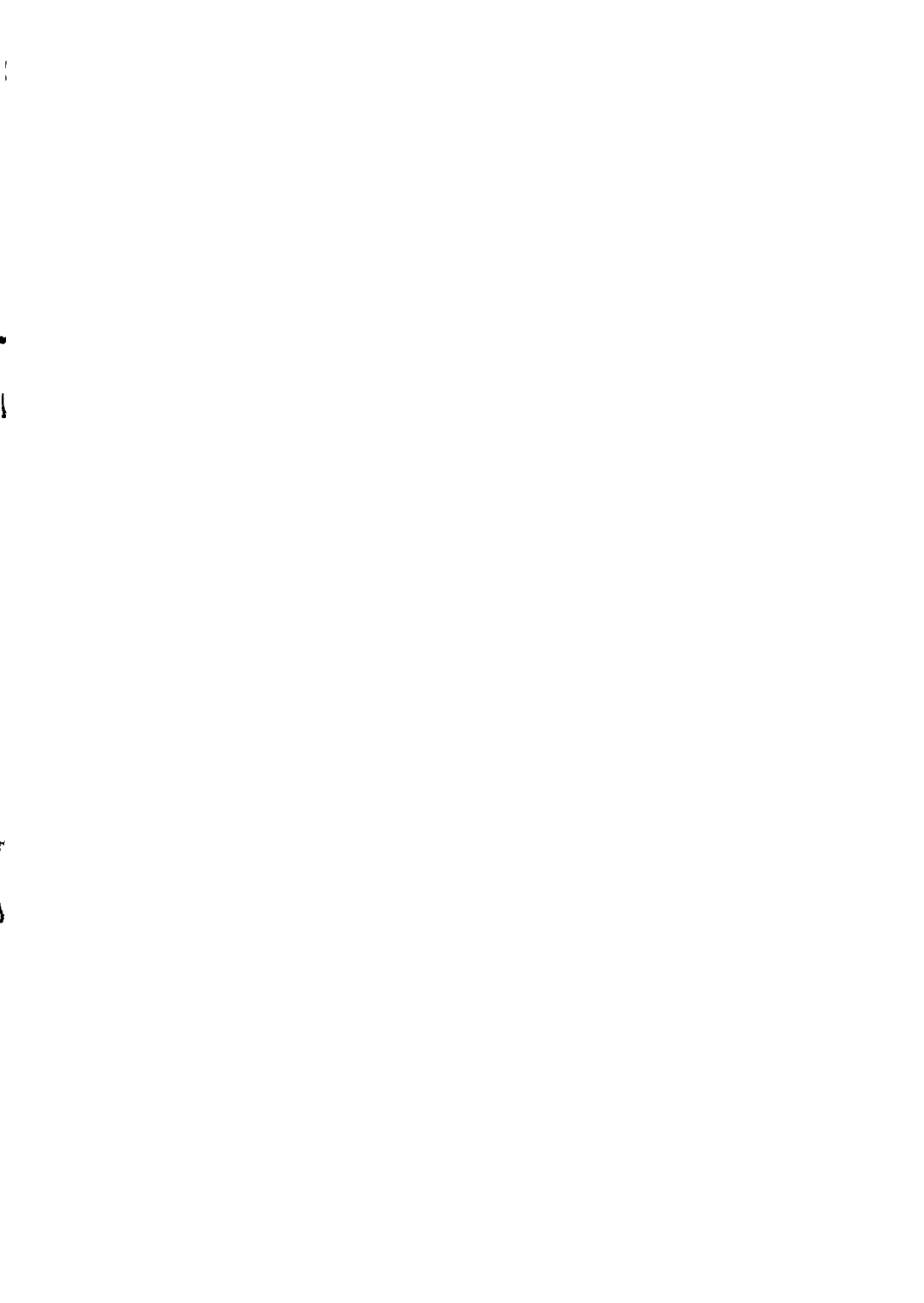
1. Бутырин П.А., Васьковская Т.А. Восстановление матрицы узловых проводимостей  $Y$  по отдельным элементам ее обратной матрицы  $Z=Y^{-1}$  в задачах диагностики // *Электричество*. — 2000. — №3. — С. 60-62.
2. Васьковская Т.А. *Диагностика сложных резистивных цепей по частям* // Шестая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. В 3-х т. — М., МЭИ, 2000. — т. 3. — С. 278, 279.
3. Бутырин П.А., Васьковская Т.А. Диагностика сложных электрических цепей по частям // *Изв. РАН Энергетика*. — 2000. — №2. — С. 136-137.
4. Васьковская Т.А. Определение матрицы контурных сопротивлений по части ее обратной матрицы в задачах диагностики резистивных цепей // *Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: Тез. докладов*. — Красноярск, КГТУ, 2000. — С. 136, 137.
5. Васьковская Т.А. Диагностика сложных резистивных цепей по частям с использованием гибридного базиса. // *Труды IV международной конфе-*



- ренции "Электротехника, электромеханика и электротехнологии". — М., МЭИ, 2000. — С. 180.
6. Васьковская Т.А. Исследование влияния декомпозиции электрических цепей на точность решения задач их диагностики по частям // Седьмая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докладов. В 3-х т. — М.: Изд-во МЭИ, 2001. — т. 3. — С. 279.
  7. Бутырин П.А., Васьковская Т.А. Принципы декомпозиции сложных электрических цепей при их диагностике по частям // Электричество. — 2001. — №6. — С. 41-48.
  8. Бутырин П.А., Васьковская Т.А. Декомпозиция резистивных цепей при их диагностике по частям // Материалы V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы "Фундаментальные исследования в технических университетах". — СПб., СПбГТУ, 2001. — С. 199.
  9. Васьковская Т.А. Исследование предельных случаев декомпозиции электрической цепи при ее диагностике по частям // Восьмая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. В 3-х т. — М., МЭИ, 2002. — т. 3. — С. 295, 296.
  10. Васьковская Т.А. Исследование упрощенных диагностических моделей трехфазных трансформаторов // Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России: Труды Международной научно-практической конференции. — СПб., СПбГТУ, 2002. — С. 254, 255.
  11. Бутырин П.А., Васьковская Т.А., Алпатов М.Е. Упрощенные математические модели трехфазных трансформаторов для целей диагностики // Электро. — 2002. — №1. — С. 17-20.
  12. Бутырин П.А., Васьковская Т.А., Диагностика электрических цепей по частям. Теоретические основы и компьютерный практикум: Учебное пособие. — М.: Издательство МЭИ, 2003. — 112 с.

Подписано в печать 18.03, Зак. 273 Тираж 100 П.л. 1,25  
 Полиграфический центр МЭИ (ТУ)  
 Красноказарменная ул., д. 13





2005-A  
13765  
# 13765