

УДК 621.311

## ОСНОВНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ДИАКОПТИЧЕСКИЕ ФОРМЫ УРАВНЕНИЙ РЕЖИМОВ БЭЭС И РЕШЕНИЕ ИХ МЕТОДАМИ ДИАКОПТИКИ

Акад. Академии электротехнических наук РФ  
и Международной Академии информатизации,  
засл. деят. науки и техники РФ,  
докт. техн. наук, проф. **ГЕРАСКИН О. Т.**

*Институт повышения квалификации государственных служащих  
Российской академии государственной службы  
при Президенте Российской Федерации*

Установившиеся режимы в больших электроэнергетических системах описываются с помощью нелинейных математических моделей, формируемых на основе уравнений узловых напряжений для подсистем обобщенного дерева и уравнений контурных токов для обобщенных контуров схемы БЭЭС [1, 2].

В данной статье рассматриваются две основные линейные диакоптические формы математического описания режимов в БЭЭС: прямая ( $Z_k - Y_j$ ) и обращенная ( $Y_k - Z_j$ ). В первом случае подсистемы БЭЭС представлены в уравнениях матрицами проводимостей узлов, а во втором – матрицами узловых сопротивлений подсистем. Методика расчета узловых напряжений в схемах БЭЭС включает выполнение следующих этапов: выделение обобщенного дерева в результате декомпозиции схемы БЭЭС по узлам путем расщепления узлов и наращивания обобщенного дерева из подсистем, выбор полной системы независимых обобщенных контуров в схеме БЭЭС, формирование и решение уравнений контурных токов и уравнений узловых напряжений методом диакоптики последовательно по подсистемам.

**1. Основные линейные диакоптические формы уравнений режимов БЭЭС.** Уравнения режимов БЭЭС можно записать в следующем виде:

прямая ( $Z_k - Y_j$ ) диакоптическая форма –

$$\begin{aligned} E_k + Z_k I_k &= 0_k; \\ Y_1 U_1 + I_1 &= 0_1; \\ \dots & \dots \dots \dots \\ Y_M U_M + I_M &= 0_M; \end{aligned} \tag{1}$$

обращенная ( $Y_k - Z_j$ ) форма –

$$\begin{aligned} Y_k E_k + I_k &= 0_k; \\ U_1 + Z_1 I_1 &= 0_1; \\ \dots & \dots \dots \dots \\ U_M + Z_M I_M &= 0_M, \end{aligned} \tag{2}$$



переменных обобщенного дерева к узловым переменным подсистем, и, поскольку при выборе положительного направления для узловых токов источников от узла любая строка матрицы  $\mathbf{D}$  содержит только один тип ненулевых элементов  $+1$ , умножения подматриц  $\mathbf{D}_j$  на вектор  $\mathbf{J}$  сводятся к выполнению простых операций сложения соответствующих элементов вектора;

$Y_{1n1}, \dots, Y_{mnm}$  – столбцовые подматрицы от матриц проводимостей узлов подсистем  $Y_1, \dots, Y_m$ , соответствующие балансирующим узлам подсистем;

$U_{n1}, \dots, U_{nm}$  – напряжения балансирующих узлов по току подсистем;

$U_1, \dots, U_m$  – искомые векторы узловых напряжений для подсистем БЭЭС.

Таким образом, вектор узловых токов  $\mathbf{I}_j$  может быть определен только после того, как будет вычислено напряжение  $U_{nj}$  балансирующего узла для данной подсистемы.

Для того чтобы сформировать системы линейных уравнений режимов БЭЭС, необходимо провести декомпозицию схемы по узлам, выделить обобщенное дерево, на основе которого выбрать систему независимых обобщенных контуров и выполнить определенные матричные вычисления.

Расчеты искомых переменных  $\mathbf{I}_k$  и  $U_1, \dots, U_m$  по уравнениям (1) или (2) включают вычисление контурных токов  $\mathbf{I}_k$  и расчеты узловых напряжений  $U_1, \dots, U_m$  методом диакоптики.

**2. Декомпозиция схемы БЭЭС по узлам. Выделение обобщенного дерева и выбор системы независимых обобщенных контуров [3].** В исходной схеме БЭЭС обобщенное дерево может быть получено в результате декомпозиции схемы по узлам. Для этого выбирается первая подсистема, содержащая базисный узел  $n$ , принимающийся в качестве балансирующего узла для первой подсистемы. Далее схема дерева наращивается из подсистем, радиально отходя от базисного узла. Если очередная  $j$ -я подсистема в процессе наращивания дерева будет соединена со схемой последовательно через один узел, то этот узел принимается в качестве балансирующего узла по току  $n_j$  и подсистема обычным образом подсоединяется к схеме формируемого обобщенного дерева. В том случае, когда  $j$ -я подсистема соединена со схемой параллельно, т. е. она имеет несколько узлов связи, один из них выбирается в качестве балансирующего узла по току  $n_j$  для данной подсистемы, а все остальные узлы связи расщепляются (каждый узел на два). В результате декомпозиции схемы БЭЭС по узлам из нее выделяется обобщенное дерево.

На рис. 1 приведена исходная схема БЭЭС. Обобщенное дерево, полученное в результате декомпозиции схемы БЭЭС по узлам, показано на рис. 2.

Для того чтобы режимы в исходной схеме БЭЭС и обобщенном дереве были эквивалентными, необходимо в обобщенном дереве между расщепленными узлами ввести контурные токи. Контурные токи всегда можно выбрать так, что они по величине и направлению будут совпадать с токами инъекций расщепленных узлов подсистем со штрихами, при этом заданные узловые токи источников  $J_i$  должны быть отнесены к расщепленным узлам без штрихов. Контурные токи уравновешивают напряжения пар расщепленных узлов подсистем в обобщенном дереве.

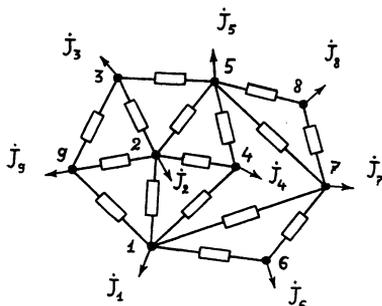


Рис. 1

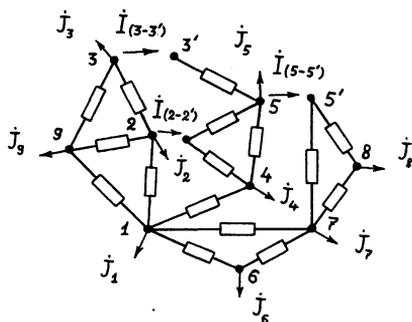


Рис. 2

Выбранная совокупность контуров на основе обобщенного дерева составляет полную систему независимых обобщенных контуров в схеме БЭЭС.

**3. Формирование и решение уравнений контурных токов БЭЭС.** Построить системы уравнений контурных токов – это значит вычислить матрицы  $\Delta Z_{кд}$ ,  $Z_{к}$  и  $Y_{к}$ , входящие в уравнения (1) и (2) и необходимые для расчета векторы  $E_{к}$  общих ЭДС. Матрицы  $\Delta Z_{кд}$  и  $Z_{к}$  формируются путем наращивания обобщенного дерева из подсистем, радиально отходя от базисного узла, и параллельно с этим наращивается также и матрица узловых сопротивлений обобщенного дерева  $Z_{д}$  и матрицы  $\Delta Z_{кд}$  и  $Z_{к}$ .

В общем случае, на  $V$ -м этапе наращивания обобщенного дерева выполняется два шага. Сначала составляется квазидиагональная блочная матрица  $Z_{кв}^{(V)}$  путем размещения на ее главной диагонали матриц узловых сопротивлений нарастающего обобщенного дерева  $Z^{(V-1)}$  и новой подсоединяемой подсистемы  $Z_v$ .

Затем осуществляется приведение элементов квазидиагональной блочной матрицы к одному базисному узлу дерева. Пересчет матрицы  $Z_{кв}^{(V)}$  в матрицу узловых сопротивлений  $Z^{(V)}$  обобщенного дерева производится путем выполнения следующих операций. Пусть  $V$ -я подсистема с матрицей  $Z_v$  присоединяется к схеме нарастающего обобщенного дерева с матрицей  $Z^{(V-1)}$  через узел связи  $i$ . Тогда  $i$ -й столбец матрицы  $Z^{(V-1)}$  переносится вправо и размещается во всех столбцах, соответствующих узлам  $V$ -й подсистемы, а  $i$ -я строка матрицы  $Z^{(V-1)}$  переносится вниз и размещается во всех строках, соответствующих узлам  $V$ -й подсистемы, и диагональный  $(i, i)$ -й элемент матрицы  $Z^{(V-1)}$  прибавляется ко всем элементам матрицы  $Z_v$ . В результате квазидиагональная блочная матрица  $Z_{кв}^{(V)}$  преобразуется в искомую матрицу  $Z^{(V)}$ .

В частном случае, когда балансирующий узел по току присоединяемой подсистемы совпадает с базисным узлом  $n$  схемы БЭЭС, второй шаг не производится, и искомая матрица  $Z^{(V)}$  принимается равной матрице  $Z_{кв}^{(V)}$ .

По мере наращивания матрицы узловых сопротивлений  $Z_{д}$  для обобщенного дерева наращиваются также и матрицы  $\Delta Z_{кд}$  и  $Z_{к}$  в соответствии с выражениями:

$$\Delta Z_{кд}^{(V)} = C_i^{(V)} Z_{д}^{(V)}; \quad (11)$$

$$Z_{к}^{(V)} = \Delta Z_{кд}^{(V)} C^{(V)}. \quad (12)$$

В процессе наращивания достаточно получать и хранить в памяти ЭВМ только те строки матрицы  $Z_d^{(i)}$ , которые соответствуют расщепленным узлам и балансирующим узлам подсистем.

После того как будут сформированы матрицы  $\Delta Z_{кд}$  и  $Z_k$ , можно вычислить матрицу контурных проводимостей

$$Y_k = Z_k^{-1}. \quad (13)$$

Вектор общих ЭДС, наведенных в обобщенных контурах схемы БЭЭС, определяется по матричным выражениям (6)–(8).

Искомый вектор контурных токов  $I_k$  может быть вычислен из решения системы линейных уравнений контурных токов в прямой  $Z_k$ -форме

$$E_k + Z_k I_k = 0_k \quad (14)$$

или по матричному выражению, полученному из уравнений контурных токов, в обращенной  $Y_k$ -форме

$$Y_k E_k + I_k = 0_k. \quad (15)$$

**Пример расчета.** Исходная схема БЭЭС приведена на рис. 1. Одно из возможных обобщенных деревьев и выбранные на его основе контурные токи показаны на рис. 2. Вектор узловых токов источников  $J_d$  с положительным направлением от узлов для обобщенного дерева и напряжение в базисном узле  $U_n$  заданы:

$$J_d' = \begin{array}{c|c} 1 & 3,22 \\ 2 & 1,74 \\ 3 & 0,40 \\ 4 & 1,44 \\ 5 & -6,20 \\ 2' & 0 \\ 3' & 0 \\ 6 & -0,90 \\ 7 & 5,12 \\ 8 & -0,08 \\ 5' & 0 \end{array}; \quad J_d'' = \begin{array}{c|c} 1 & -0,74 \\ 2 & -2,68 \\ 3 & -0,40 \\ 4 & -0,82 \\ 5 & 2,16 \\ 2' & 0 \\ 3' & 0 \\ 6 & 1,80 \\ 7 & -2,04 \\ 8 & 0,64 \\ 5' & 0 \end{array}; \quad U_9' = 115; \quad U_9'' = 0.$$

Полные матрицы проводимостей узлов подсистем также известны:

$$Y_{1п}' = \begin{array}{c|cccc} & 9 & 1 & 2 & 3 \\ 9 & 0,18 & -0,02 & -0,10 & -0,06 \\ 1 & -0,02 & 0,14 & -0,12 & 0 \\ 2 & -0,10 & -0,12 & 0,32 & -0,10 \\ 3 & -0,06 & 0 & -0,10 & 0,16 \end{array}; \quad Y_{1п}'' = \begin{array}{c|cccc} & 9 & 1 & 2 & 3 \\ 9 & -0,52 & 0,14 & 0,30 & 0,08 \\ 1 & 0,14 & -0,30 & 0,16 & 0 \\ 2 & 0,30 & 0,16 & -0,66 & 0,20 \\ 3 & 0,08 & 0 & 0,20 & -0,28 \end{array};$$

$$Y_{2n}' = \begin{matrix} & 1 & 4 & 5 & 2' & 3' \\ 1 & 0,10 & -0,10 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -0,10 & 0,32 & -0,12 & -0,10 & 0 \\ 5 & 0 & -0,12 & 0,24 & -0,02 & -0,10 \\ 2' & 0 & -0,10 & -0,02 & 0,12 & 0 \\ 3' & 0 & 0 & -0,10 & 0 & 0,10 \end{matrix}; \quad Y_{2n}'' = \begin{matrix} & 1 & 4 & 5 & 2' & 3' \\ 1 & -0,20 & 0,20 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0,20 & -0,66 & 0,16 & 0,30 & 0 \\ 5 & 0 & 0,16 & -0,60 & 0,14 & 0,30 \\ 2' & 0 & 0,30 & 0,14 & -0,44 & 0 \\ 3' & 0 & 0 & 0,30 & 0 & -0,30 \end{matrix}$$

$$Y_{3n}' = \begin{matrix} & 1 & 6 & 7 \\ 1 & 0,12 & -0,10 & -0,02 \\ 6 & -0,10 & 0,20 & -0,10 \\ 7 & -0,02 & -0,10 & 0,12 \end{matrix}; \quad Y_{3n}'' = \begin{matrix} & 1 & 6 & 7 \\ 1 & -0,34 & 0,20 & 0,14 \\ 6 & 0,20 & -0,40 & 0,20 \\ 7 & 0,14 & 0,20 & -0,34 \end{matrix}$$

$$Y_{4n}' = \begin{matrix} & 7 & 8 & 5' \\ 7 & 0,16 & -0,10 & -0,06 \\ 8 & -0,10 & 0,22 & -0,12 \\ 5' & -0,06 & -0,12 & 0,18 \end{matrix}; \quad Y_{4n}'' = \begin{matrix} & 7 & 8 & 5' \\ 7 & -0,28 & 0,20 & 0,08 \\ 8 & 0,20 & -0,36 & 0,16 \\ 5' & 0,08 & 0,16 & -0,24 \end{matrix}$$

В процессе формирования обобщенного дерева были установлены балансирующие узлы по току для подсистем. Для первой подсистемы это узел 9, совпадающий с базисным узлом схемы БЭЭС, для второй и третьей подсистем – 1 и для последней, четвертой, подсистемы – узел 7.

Из полных матриц проводимостей узлов подсистем  $Y_{jn}$  выделены подматрицы  $Y_j$  и вычислены матрицы узловых сопротивлений для подсистем  $Z_j$  относительно своих балансирующих узлов:

$$Z_1' = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1,2399 & 0,2036 & 0,1899 \\ 2 & 0,2036 & 0,7623 & 0,6043 \\ 3 & 0,1899 & 0,6043 & 2,0087 \end{matrix}; \quad Z_1'' = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3,5145 & 1,2720 & 0,8728 \\ 2 & 1,2720 & 1,9914 & 1,3493 \\ 3 & 0,8728 & 1,3493 & 3,6032 \end{matrix}$$

$$Z_2' = \begin{matrix} & 4 & 5 & 2' & 3' \\ 4 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 5 & 2 & 3,6380 & 2,6199 & 3,6380 \\ 2' & 2 & 2,6199 & 2,8009 & 2,6199 \\ 3' & 2 & 3,6380 & 2,6199 & 4,6380 \end{matrix}; \quad Z_2'' = \begin{matrix} & 4 & 5 & 2' & 3' \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 5 & 4 & 7,0136 & 4,8643 & 7,0136 \\ 2' & 4 & 4,8643 & 6,3575 & 4,8643 \\ 3' & 4 & 7,0136 & 4,8643 & 10,0136 \end{matrix}$$

$$Z_3' = \begin{matrix} & 6 & 7 \\ 6 & 1,28 & 0,56 \\ 7 & 0,56 & 1,12 \end{matrix}; \quad Z_3'' = \begin{matrix} & 6 & 7 \\ 6 & 2,96 & 1,92 \\ 7 & 1,92 & 3,84 \end{matrix}$$

$$Z_4' = \begin{matrix} & 8 & 5' \\ 8 & 1,6711 & 1,1141 \\ 5' & 1,1141 & 2,7427 \end{matrix}; \quad Z_4'' = \begin{matrix} & 8 & 5' \\ 8 & 3,0239 & 2,0159 \\ 5' & 2,0159 & 4,0106 \end{matrix}$$

Далее производится процесс наращивания обобщенного дерева из подсистем и формируются матрицы  $\Delta Z_{кд}$  и  $Z_{к}$ :

$$\Delta Z_2' = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 2' & 3' & 6 & 7 & 8 & 5' \\ (2-2') & -1,036 & 0,559 & 0,414 & -3,036 & -3,656 & -3,837 & -3,656 & -1,036 & -1,036 & -1,036 & -1,036 \\ (3-3') & -1,050 & 0,401 & 1,819 & -3,050 & -4,688 & -3,670 & -5,688 & -1,050 & -1,050 & -1,050 & -1,050 \\ (5-5') & 0 & 0 & 0 & 2 & 3,638 & 2,620 & 3,638 & -0,56 & -1,12 & 2,234 & -3,863 \end{matrix}$$

$$\Delta Z_2'' = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 2' & 3' & 6 & 7 & 8 & 5' \\ (2-2') & -2,243 & 0,719 & 0,477 & -6,243 & -7,107 & -8,600 & -7,107 & -2,243 & -2,243 & -2,243 & -2,243 \\ (3-3') & -2,642 & 0,077 & 2,730 & -6,642 & -9,655 & -7,506 & -12,65 & -2,642 & -2,642 & -2,642 & -2,642 \\ (5-5') & 0 & 0 & 0 & 4 & 7,014 & 4,864 & 7,014 & -1,92 & -3,84 & -5,856 & -7,851 \end{matrix}$$

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{c} (2-2') \quad (3-3') \quad (5-5') \\
 (2-2') \\
 (3-3') \\
 (5-5') \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 4,396 & 4,071 & -2,620 \\ \hline 4,071 & 7,507 & -3,638 \\ \hline -2,620 & -3,638 & 7,501 \\ \hline \end{array} ; \quad \begin{array}{c} (2-2') \quad (3-3') \quad (5-5') \\
 (2-2') \\
 (3-3') \\
 (5-5') \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 9,319 & 7,583 & -4,864 \\ \hline 7,583 & 15,386 & -7,014 \\ \hline -4,864 & -7,014 & 14,864 \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

Матрица контурных проводимостей  $Y_k$  получается путем обращения матрицы  $Z_k$  и равна:

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{c} (2-2') \quad (3-3') \quad (5-5') \\
 (2-2') \\
 (3-3') \\
 (5-5') \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0,0628 & -0,0250 & 0,0079 \\ \hline -0,0250 & 0,0419 & 0,0117 \\ \hline 0,0079 & 0,0117 & 0,0350 \\ \hline \end{array} ; \quad \begin{array}{c} (2-2') \quad (3-3') \quad (5-5') \\
 (2-2') \\
 (3-3') \\
 (5-5') \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline -0,1599 & 0,0727 & -0,0190 \\ \hline 0,0727 & -0,1005 & -0,236 \\ \hline -0,0190 & -0,0236 & -0,0712 \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

Из полных матриц проводимостей узлов подсистем  $Y_{jn}$  формируется столбцовая матрица  $Y_{дн}$ , соответствующая базисному узлу  $n$  схемы БЭЭС, и вычисляется вектор  $I_d$  с положительным направлением от узлов:

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{|c|} \hline -0,02 \\ \hline -0,10 \\ \hline -0,06 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} ; \quad \begin{array}{|c|} \hline 0,14 \\ \hline 0,30 \\ \hline 0,08 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} ; \quad \begin{array}{|c|} \hline 0,92 \\ \hline -9,76 \\ \hline -6,50 \\ \hline 1,44 \\ \hline -6,20 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline -0,90 \\ \hline 5,12 \\ \hline -0,08 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} ; \quad \begin{array}{|c|} \hline 15,36 \\ \hline 31,82 \\ \hline 8,80 \\ \hline -0,82 \\ \hline 2,16 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 1,80 \\ \hline -2,04 \\ \hline 0,64 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

Вектор общих ЭДС в обобщенных контурах схемы БЭЭС равен:

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{|c|} \hline 23,3950 \\ \hline 34,1810 \\ \hline -37,2265 \\ \hline \end{array} ; \quad \begin{array}{|c|} \hline 13,2917 \\ \hline 23,0127 \\ \hline -49,1234 \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

Искомый вектор контурных токов  $I_k$  определяется из решения системы линейных уравнений (14) или аналитически по матричному выражению, полученному из уравнения (15):

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{|c|} \hline 0,16 \\ \hline -0,60 \\ \hline 3,42 \\ \hline \end{array} ; \quad \begin{array}{|c|} \hline 0,68 \\ \hline 0,80 \\ \hline -0,06 \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

**4. Формирование и решение уравнений узловых напряжений методом диакоптики последовательно по подсистемам.** Искомые узловые напряжения для подсистем БЭЭС могут быть вычислены из диакоптических форм уравнений узловых напряжений:  
 прямая  $Y_f$ -форма –



$$\mathbf{J}' = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 2' \\ 3' \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 5' \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{3,22} \\ \boxed{1,90} \\ \boxed{-0,20} \\ \boxed{1,44} \\ \boxed{-2,78} \\ \boxed{-0,16} \\ \boxed{0,60} \\ \boxed{-0,90} \\ \boxed{5,12} \\ \boxed{-0,08} \\ \boxed{-3,42} \end{matrix}; \quad \mathbf{J}'' = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 2' \\ 3' \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 5' \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{-0,74} \\ \boxed{-2,00} \\ \boxed{0,40} \\ \boxed{-0,82} \\ \boxed{2,10} \\ \boxed{-0,68} \\ \boxed{-0,80} \\ \boxed{1,80} \\ \boxed{-2,04} \\ \boxed{0,64} \\ \boxed{0,06} \end{matrix}$$

Далее расчеты выполняются последовательно по подсистемам.  
Для первой подсистемы имеем  $U_{n1} = U_9$ :

$$U_{n1}' = 115; \quad U_{n1}'' = 0;$$

$$\mathbf{Y}_{1n1}' = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{-0,02} \\ \boxed{-0,10} \\ \boxed{-0,06} \end{matrix}; \quad \mathbf{Y}_{1n1}'' = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{0,14} \\ \boxed{0,30} \\ \boxed{0,08} \end{matrix}; \quad \mathbf{I}_1' = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{0,74} \\ \boxed{-9,60} \\ \boxed{-7,10} \end{matrix}; \quad \mathbf{I}_1'' = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{15,62} \\ \boxed{32,50} \\ \boxed{9,60} \end{matrix}$$

Вектор узловых напряжений  $\mathbf{U}_1$  для первой подсистемы равен:

$$\mathbf{U}_1' = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{107} \\ \boxed{109} \\ \boxed{112} \end{matrix}; \quad \mathbf{U}_1'' = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{-12} \\ \boxed{-6} \\ \boxed{-4} \end{matrix}$$

Для второй подсистемы имеем  $U_{n2} = U_1$ :

$$U_{n2}' = 107; \quad U_{n2}'' = -12;$$

$$\mathbf{Y}_{2n2}' = \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 2' \\ 3' \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{-0,10} \\ \boxed{0} \\ \boxed{0} \\ \boxed{0} \end{matrix}; \quad \mathbf{Y}_{2n2}'' = \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 2' \\ 3' \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{0,20} \\ \boxed{0} \\ \boxed{0} \\ \boxed{0} \end{matrix}; \quad \mathbf{I}_2' = \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 2' \\ 3' \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{-6,86} \\ \boxed{-2,78} \\ \boxed{-0,16} \\ \boxed{0,60} \end{matrix}; \quad \mathbf{I}_2'' = \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 2' \\ 3' \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{21,78} \\ \boxed{2,10} \\ \boxed{-0,68} \\ \boxed{-0,80} \end{matrix}$$

Вектор узловых напряжений  $\mathbf{U}_2$  для второй подсистемы равен:

$$\mathbf{U}_2' = \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 2' \\ 3' \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{108} \\ \boxed{115} \\ \boxed{109} \\ \boxed{112} \end{matrix}; \quad \mathbf{U}_2'' = \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 2' \\ 3' \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{-8} \\ \boxed{-3} \\ \boxed{-6} \\ \boxed{-4} \end{matrix}$$

Для третьей подсистемы имеем  $U_{n3} = U_1$ :

$$U_{n3}' = 107; \quad U_{n3}'' = -12;$$

$$\mathbf{Y}_{3n3}' = \begin{matrix} 6 \\ 7 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{-0,10} \\ \boxed{-0,02} \end{matrix}; \quad \mathbf{Y}_{3n3}'' = \begin{matrix} 6 \\ 7 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{0,20} \\ \boxed{0,14} \end{matrix}; \quad \mathbf{I}_3' = \begin{matrix} 6 \\ 7 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{-9,20} \\ \boxed{1,16} \end{matrix}; \quad \mathbf{I}_3'' = \begin{matrix} 6 \\ 7 \end{matrix} \begin{matrix} \boxed{24,40} \\ \boxed{13,88} \end{matrix}$$

Вектор узловых напряжений  $\mathbf{U}_3$  для третьей подсистемы равен:

$$U_3 = 6 \begin{array}{|c|} \hline 110 \\ \hline 104 \\ \hline \end{array}; \quad U_3'' = 6 \begin{array}{|c|} \hline -14 \\ \hline -16 \\ \hline \end{array}$$

И, наконец, для последней, четвертой, подсистемы имеем  $U_{n4} = U_7$ :

$$U_{n4}' = 104; \quad U_{n4}'' = -16;$$

$$Y_{4n4}' = 8 \begin{array}{|c|} \hline -0,10 \\ \hline -0,06 \\ \hline \end{array}; \quad Y_{4n4}'' = 8 \begin{array}{|c|} \hline 0,20 \\ \hline 0,08 \\ \hline \end{array}; \quad I_4' = 8 \begin{array}{|c|} \hline -0,08 \\ \hline -3,42 \\ \hline \end{array}; \quad I_4'' = 8 \begin{array}{|c|} \hline 0,64 \\ \hline 0,06 \\ \hline \end{array}$$

Вектор узловых напряжений  $U_4$  для первой подсистемы равен:

$$U_4' = 8 \begin{array}{|c|} \hline 110 \\ \hline 115 \\ \hline \end{array}; \quad U_4'' = 8 \begin{array}{|c|} \hline -10 \\ \hline -3 \\ \hline \end{array}$$

Искомый вектор узловых напряжений  $U_d$  для обобщенного дерева равен:

$$U_{дл}' = \begin{array}{|c|} \hline 1 \quad 107 \\ \hline 2 \quad 109 \\ \hline 3 \quad 112 \\ \hline 4 \quad 108 \\ \hline 5 \quad 115 \\ \hline 2' \quad 109 \\ \hline 3' \quad 112 \\ \hline 6 \quad 110 \\ \hline 7 \quad 104 \\ \hline 8 \quad 110 \\ \hline 5' \quad 115 \\ \hline \end{array}; \quad U_{дл}'' = \begin{array}{|c|} \hline 1 \quad -12 \\ \hline 2 \quad -6 \\ \hline 3 \quad -4 \\ \hline 4 \quad -8 \\ \hline 5 \quad -3 \\ \hline 2' \quad -6 \\ \hline 3' \quad -4 \\ \hline 6 \quad -14 \\ \hline 7 \quad -16 \\ \hline 8 \quad -10 \\ \hline 5' \quad -3 \\ \hline \end{array}$$

## ВЫВОДЫ

1. Предложены основные линейные диакоптические формы уравнений для описания режимов в больших электроэнергетических системах. Формирование уравнений предполагает выполнение декомпозиции исходной схемы БЭЭС по узлам с целью выделения обобщенного дерева, составленного из заданных подсистем, и выбора на его основе полной системы независимых обобщенных контуров схемы БЭЭС.

2. Диакоптические формы уравнений режимов БЭЭС используют матрицы проводимостей узлов и матрицы узловых сопротивлений подсистем, имеющие меньшие размеры по сравнению с аналогичными матрицами для полной схемы БЭЭС, что дает значительную экономию в вычислениях и быстродействие при реализации математических моделей режимов.

3. Для решения линейных форм уравнений режимов БЭЭС разработаны методы диакоптики, где расчеты узловых напряжений производятся последовательно по подсистемам. Методы диакоптики иллюстрированы на конкретных числовых примерах расчета на ЭВМ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гераскин О. Т. Основы теории и методов расчета режимов больших электро-энергетических систем. – М.: ИПКгосслужбы, 1996. – 166 с.
2. Гераскин О. Т. Декомпозиция, диакоптика и разреженность в проблеме моделирования и расчета режимов больших электроэнергетических систем // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 1999. – № 1–2. – С. 31–39.
4. Гераскин О. Т. Обобщение второго закона Кирхгофа и формирование уравнений контурных токов в больших электроэнергетических системах // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 3–14.

Представлена кафедрой  
эксплуатации электрических станций,  
сетей и систем

Поступила 05.10.1999

УДК 621.3.066.6

### ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ПЛОСКОМ КОНТАКТНОМ СОЕДИНЕНИИ РАЗНОРОДНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Докт. техн. наук, проф. **ГЕРАСИМОВИЧ А. Н.**, инж. **ГЕРАСИМОВИЧ Д. А.**

*Белорусская государственная политехническая академия*

**Инж. ЯКОВЛЕВ Г. В.**

*ПО «Витебскэнерго»*

Плоские контакты из разнородных материалов широко применяются на практике (соединение ошиновки из плоских алюминиевых и других проводников с медными вводами электрических аппаратов распределительных устройств и т. п.) [1]. Во избежание коррозии контактного соединения используются специальные защитные меры (покрытие кадмием, оловянно-цинковым сплавом и др.), что требует рассматривать контактный узел при проникновении в него электромагнитного поля как многослойную среду. На работу контакта существенное влияние оказывает объемное распределение электрического поля, и задача его расчета представляет как практическую, так и теоретическую ценность. Основы расчета электрического поля (токораспределения) в плоском соединении при аппроксимации многослойной среды однородной приведены в [2]. Однако такой подход правильно отражает только качественную картину распределения поля в контактном узле из разнородных проводников. Достоверные количественные оценки объемного токораспределения в данном случае могут быть получены лишь на основе расчета поля при индивидуальном учете электромагнитных свойств каждого из проводников.

Распределение параметров электромагнитного поля в плоском соединении рассмотрим на примере рис. 1. Соединение образовано двумя разнородными изотропными проводниками 1 и 2 одинаковой ширины