

УДК 621.311

## К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ СХЕМ БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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*

Как известно, большая электроэнергетическая система представляет собой совокупность произвольно связанных подсистем, где при расчетах режимов широко применяются методы декомпозиции и диакоптики [1, 2]. При этом важное практическое значение приобретают вопросы, связанные с преобразованием и упрощением исходной схемы БЭЭС. В данной статье рассматривается проблема эквивалентирования пассивной части схемы БЭЭС в расчетах режимов и описываются общие правила формирования полной матрицы проводимостей узлов и матрицы узловых сопротивлений для части схемы БЭЭС при параллельном и радиальном соединениях подсистем. Известные в электротехнике правила определения общей проводимости при параллельном соединении ветвей и общего сопротивления при последовательном соединении ветвей электрической сети являются частным случаем приведенных в статье общих правил эквивалентирования схемы БЭЭС, составленной из подсистем.

**1. Параллельное соединение подсистем БЭЭС.** Согласно определению подсистемы в БЭЭС будут соединены параллельно в том случае, если они связаны друг с другом через два и более узлов, как показано на рис. 1. При расчетах режимов в БЭЭС подсистемы обычно заданы полными матрицами проводимостей узлов  $Y_{п1}, \dots, Y_{пM}$ .

Задача состоит в получении полной матрицы проводимостей узлов  $Y_n$  для общей части схемы БЭЭС при выполнении условий эквивалентности режимов в общей схеме БЭЭС и схеме, составленной из параллельно соединенных подсистем. Условия эквивалентности режимов предполагают, что напряжения в узлах и токи инъекций для всех узлов подсистем, кроме узлов связи, не изменяются при упрощении схемы, а токи инъекций узлов связи равны сумме токов инъекций соответствующих узлов подсистем, т. е.

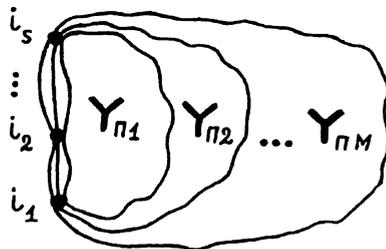


Рис. 1

$$I_{ii_j} = \sum_{k=1}^M I_{ii_j k}, \quad j = 1, \dots, s. \quad (1)$$

На основе обобщенного закона Ома для подсистем БЭЭС [3] можно записать математические соотношения между узловыми напряжениями и токами инъекций узлов в подсистемах

$$\mathbf{I}_{ип k} = \mathbf{Y}_{п k} \mathbf{U}_{п k}, \quad k = 1, \dots, M. \quad (2)$$

Далее, расширяя матрицы и векторы, входящие в уравнения (2), и записывая их до размеров всех узлов рассматриваемой общей части схемы БЭЭС, получим матричные уравнения в виде

$$\mathbf{I}_{ип k \text{ расш}} = \mathbf{Y}_{п k \text{ расш}} \mathbf{U}_{п k \text{ расш}}, \quad k = 1, \dots, M. \quad (3)$$

Условия эквивалентности режимов общей части схемы БЭЭС и схемы, составленной из параллельно соединенных подсистем, будут соблюдены при выполнении обобщенного первого закона Кирхгофа [4], если сложить векторы токов инъекций узлов  $\mathbf{I}_{ип k \text{ расш}}$  подсистем. В результате получим систему уравнений в виде

$$\mathbf{I}_{ип} = \mathbf{Y}_{п} \mathbf{U}_{п}. \quad (4)$$

Отсюда можно сформулировать общие правила эквивалентирования части схемы БЭЭС, которые читаются следующим образом: при параллельном соединении подсистем полная матрица проводимостей узлов общей части схемы  $\mathbf{Y}_{п}$  равна алгебраической сумме расширенных полных матриц проводимостей узлов отдельных подсистем  $\mathbf{Y}_{п k \text{ расш}}$ , т. е.

$$\mathbf{Y}_{п} = \sum_{k=1}^M \mathbf{Y}_{п k \text{ расш}}. \quad (5)$$

**Пример.** На рис. 2 показана часть схемы БЭЭС, где три подсистемы соединены параллельно через узлы 2, 5 и 9.

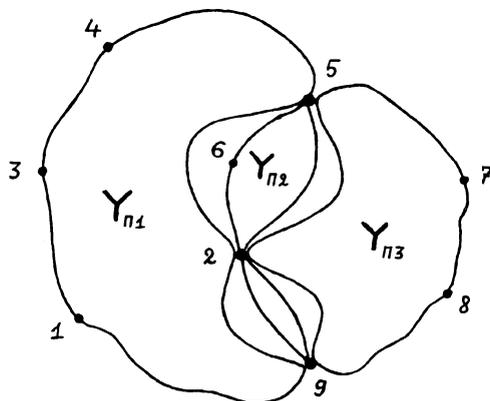


Рис. 2

Полные матрицы проводимостей узлов подсистем заданы и равны:

$$Y_{n1}' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,18 & -0,10 & -0,06 & 0 & 0 & -0,02 \\ -0,10 & 0,20 & -0,10 & 0 & 0 & 0 \\ -0,06 & -0,10 & 0,38 & -0,10 & -0,12 & 0 \\ 0 & 0 & -0,10 & 0,20 & -0,10 & 0 \\ 0 & 0 & -0,12 & -0,10 & 0,22 & 0 \\ -0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

$$Y_{n1}'' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0,52 & 0,30 & 0,08 & 0 & 0 & 0,14 \\ 0,30 & -0,50 & 0,20 & 0 & 0 & 0 \\ 0,08 & 0,20 & -0,64 & 0,20 & 0,16 & 0 \\ 0 & 0 & 0,20 & -0,50 & 0,30 & 0 \\ 0 & 0 & 0,16 & 0,30 & -0,46 & 0 \\ 0,14 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,14 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

$$Y_{n2}' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 5 & 6 & 9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 5 \\ 6 \\ 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,28 & -0,10 & -0,06 & -0,12 \\ -0,10 & 0,20 & -0,10 & 0 \\ -0,06 & -0,10 & 0,16 & 0 \\ -0,12 & 0 & 0 & 0,12 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

$$Y_{n2}'' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 5 & 6 & 9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 5 \\ 6 \\ 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0,54 & 0,30 & 0,08 & 0,16 \\ 0,30 & -0,50 & 0,20 & 0 \\ 0,08 & 0,20 & -0,22 & 0 \\ 0,16 & 0 & 0 & -0,16 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

$$Y_{n3}' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 5 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 5 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,12 & 0 & -0,02 & -0,10 \\ 0 & 0,10 & -0,10 & 0 \\ -0,02 & -0,10 & 0,24 & -0,12 \\ -0,10 & 0 & -0,12 & 0,32 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

$$Y_{n3}'' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 5 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 5 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0,44 & 0 & 0,14 & 0,30 \\ 0 & -0,30 & 0,30 & 0 \\ 0,14 & 0,30 & -0,60 & 0,16 \\ 0,30 & 0 & 0,16 & -0,66 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

После расширения матриц до полного числа узлов и их сложения получим искомую матрицу проводимостей узлов для общей части схемы:

$$Y_n' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,18 & -0,10 & -0,06 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,02 \\ -0,10 & 0,60 & -0,10 & 0 & -0,10 & -0,06 & -0,02 & -0,10 & -0,12 \\ -0,06 & -0,10 & 0,38 & -0,10 & -0,12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,10 & 0,20 & -0,10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,10 & -0,12 & -0,10 & 0,52 & -0,10 & -0,10 & 0 & 0 \\ 0 & -0,06 & 0 & 0 & -0,10 & 0,16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,02 & 0 & 0 & -0,10 & 0 & 0,24 & -0,12 & 0 \\ 0 & -0,10 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,12 & 0,32 & -0,10 \\ -0,02 & -0,12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,10 & 0,24 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

$$Y_n'' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0,52 & 0,30 & 0,08 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,14 \\ 0,30 & -1,48 & 0,20 & 0 & 0,30 & 0,08 & 0,14 & 0,30 & 0,16 \\ 0,08 & 0,20 & -0,64 & 0,20 & 0,16 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,20 & -0,50 & 0,30 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,30 & 0,16 & 0,30 & -1,26 & 0,20 & 0,30 & 0 & 0 \\ 0 & 0,08 & 0 & 0 & 0,20 & -0,28 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,14 & 0 & 0 & 0,30 & 0 & -0,60 & 0,16 & 0 \\ 0 & 0,30 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,16 & -0,66 & 0,20 \\ 0,14 & 0,16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,20 & -0,50 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

В частном случае, когда подсистемы представляют собой ветви электрической сети, общие правила эквивалентирования схемы вырождаются в известную в электротехнике формулу определения общей проводимости  $Y_{общ}$  при параллельном соединении ветвей

$$Y_{общ} = \sum_{k=1}^M Y_k. \quad (6)$$

В качестве примера рассмотрим часть схемы электрической сети, где три ветви с проводимостями  $y_1$ ,  $y_2$  и  $y_3$  соединены параллельно между узлами 1 и 2.

Полные матрицы проводимостей узлов для отдельных ветвей могут быть записаны как:

$$Y_{n1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} y_1 & -y_1 \\ -y_1 & y_1 \end{bmatrix} \end{matrix}; \quad Y_{n2} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} y_2 & -y_2 \\ -y_2 & y_2 \end{bmatrix} \end{matrix}; \quad Y_{n3} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} y_3 & -y_3 \\ -y_3 & y_3 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Искомая полная матрица проводимостей узлов для общей схемы равна

$$Y_n = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (y_1 + y_2 + y_3) & -(y_1 + y_2 + y_3) \\ -(y_1 + y_2 + y_3) & (y_1 + y_2 + y_3) \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Система уравнений (4) при параллельном соединении ветвей электрической сети содержит два уравнения:

$$\begin{aligned} I_{u1} &= (y_1 + y_2 + y_3) (U_1 - U_2); \\ I_{u1} &= -I_{u2}. \end{aligned}$$

Откуда получим, что

$$y_{\text{общ}} = y_1 + y_2 + y_3.$$

**2. Радиальное соединение подсистем БЭЭС.** По определению, подсистемы в схеме БЭЭС будут связаны радиально, если они образуют дерево из подсистем. Такое дерево в дальнейшем будет называться обобщенным. На рис. 3 показан пример радиального соединения подсистем через узлы связи  $i_1, \dots, i_5$ , в которых отсутствуют токи источников.

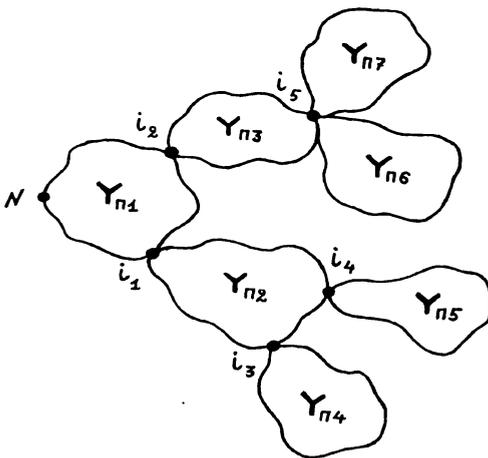


Рис. 3

Задача состоит в получении матрицы узловых сопротивлений  $Z_{(N)}$  при выбранном базисном узле  $N$  для общей части схемы БЭЭС при выполнении условий эквивалентности режимов в общей части схемы БЭЭС и в схеме обобщенного дерева, составленного из подсистем. Условия эквивалентности режимов предполагают, что напряжения и токи инъекций для всех узлов подсистем, кроме узлов связи, не изменяются при упрощении схемы (узлы связи должны быть исключены).

Матрица узловых сопротивлений  $Z_d$  для обобщенного дерева может быть получена из матриц узловых сопротивлений  $Z_k$  отдельных подсистем.

тем в результате наращивания схемы обобщенного дерева из подсистем, радиально отходя от базисного узла [5].

Процесс наращивания схемы обобщенного дерева состоит в следующем. Один из узлов связи в обобщенном дереве выбирается в качестве базисного, например узел с номером  $N$ , расположенный в первой подсистеме. Матрица узловых сопротивлений  $\mathbf{Z}^{(1)}$  для наращиваемой схемы на первом этапе равна матрице узловых сопротивлений  $\mathbf{Z}_1$  первой подсистемы, рассчитанной относительно базисного узла схемы, т. е.

$$\mathbf{Z}^{(1)} = \mathbf{Z}_1. \quad (7)$$

Далее схема обобщенного дерева наращивается из подсистем, радиально отходя от базисного узла, вместе с чем наращивается также матрица узловых сопротивлений схемы. В общем случае на  $\nu$ -м этапе наращивания выполняются два шага. На первом составляется квазидиагональная блочная матрица  $\mathbf{Z}_{\text{КВ}}^{(\nu)}$  из матрицы узловых сопротивлений наращиваемой схемы  $\mathbf{Z}^{(\nu-1)}$  и матрицы узловых сопротивлений  $\mathbf{Z}_\nu$  очередной присоединяемой подсистемы

$$\mathbf{Z}_{\text{КВ}}^{(\nu)} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}^{(\nu-1)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}_\nu \end{bmatrix}. \quad (8)$$

На втором шаге полученная квазидиагональная блочная матрица приводится к одному базисному напряжению. При этом производится пересчет матрицы  $\mathbf{Z}_{\text{КВ}}^{(\nu)}$  в матрицу узловых сопротивлений  $\mathbf{Z}^{(\nu)}$  обобщенного дерева путем выполнения следующих операций. Допустим, что  $\nu$ -я подсистема, отображаемая матрицей  $\mathbf{Z}_\nu$ , присоединяется к схеме, отображаемой матрицей  $\mathbf{Z}^{(\nu-1)}$ , через узел связи  $i$ . Тогда столбец  $i$  матрицы  $\mathbf{Z}^{(\nu-1)}$  переносится вправо и размещается во всех столбцах, соответствующих узлам  $\nu$ -й подсистемы, строка  $i$  матрицы  $\mathbf{Z}^{(\nu-1)}$  переносится вниз и размещается во всех строках, соответствующих узлам  $\nu$ -й подсистемы и  $(i, i)$ -й диагональный элемент матрицы  $\mathbf{Z}^{(\nu-1)}$  прибавляется ко всем элементам матрицы  $\mathbf{Z}_\nu$ . В результате квазидиагональная блочная матрица  $\mathbf{Z}_{\text{КВ}}^{(\nu)}$  преобразуется в матрицу  $\mathbf{Z}^{(\nu)}$ .

В частном случае, когда балансирующий узел присоединяемой подсистемы совпадает с базисным узлом, второй шаг вычислений не производится, и искомая матрица  $\mathbf{Z}^{(\nu)}$  принимается равной матрице  $\mathbf{Z}_{\text{КВ}}^{(\nu)}$ .

После наращивания полной схемы обобщенного дерева из подсистем получается матрица узловых сопротивлений  $\mathbf{Z}_d$  обобщенного дерева.

Далее из матрицы  $\mathbf{Z}_d$  исключаются все строки (после эквивалентирования схемы не определяются напряжения в узлах связи) и столбцы (в узлах связи отсутствуют токи источников), соответствующие узлам связи подсистем, и получается искомая матрица  $\mathbf{Z}_{(N)}$  для общей части схемы БЭЭС.

**3. Последовательное соединение подсистем БЭЭС.** Подсистемы будут соединены последовательно, если они связаны друг с другом только через один узел, как показано на рис. 4. В узлах связи  $i_1, \dots, i_s$  подсистем отсутствуют токи источников. В качестве базисного узла  $N$  принимается один из узлов первой системы, отличающийся от узла связи  $i_1$ .

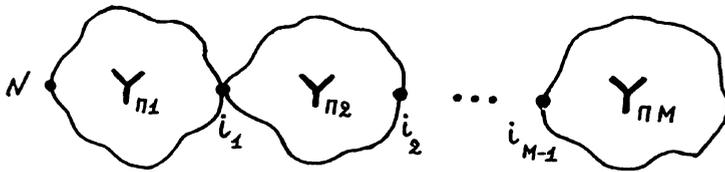


Рис. 4

Последовательное соединение подсистем БЭЭС является частным случаем радиального. Поэтому техника преобразования схемы и приведения ее к одной эквивалентной схеме остается такой же, как и прежде, т. е. на основе матриц узловых сопротивлений подсистем  $Z_k$ , рассчитанных относительно своих балансирующих узлов по току  $i_{(k-1)}$ , формируется матрица узловых сопротивлений  $Z_d$  путем наращивания схемы, радиально отходя от базисного узла. После окончания процесса наращивания схемы из полученной матрицы  $Z_d$  исключаются строки и столбцы, соответствующие узлам связи, и получается искомая матрица  $Z_{(N)}$ .

**Пример.** На рис. 5 показана часть схемы БЭЭС, где подсистемы соединены последовательно через узлы связи 3 и 5. Узел 9 выбран в качестве базисного.

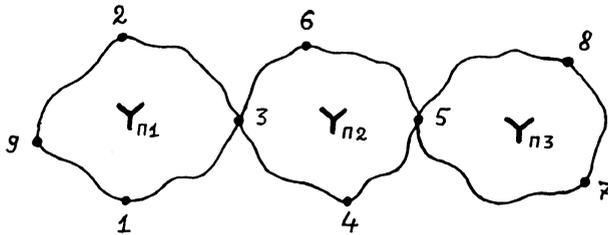


Рис. 5

Полные матрицы проводимостей узлов подсистем равны:

$$\begin{aligned}
 Y_{п1}' &= \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 9 \\ \hline 1 & 0,28 & -0,12 & -0,06 & -0,10 \\ 2 & -0,12 & 0,24 & -0,10 & -0,02 \\ 3 & -0,06 & -0,10 & 0,16 & 0 \\ 9 & -0,10 & -0,02 & 0 & 0,12 \end{array}; & Y_{п1}'' &= \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 9 \\ \hline 1 & -0,54 & 0,16 & 0,08 & 0,30 \\ 2 & 0,16 & -0,50 & 0,20 & 0,14 \\ 3 & 0,08 & 0,20 & -0,28 & 0 \\ 9 & 0,30 & 0,14 & 0 & -0,44 \end{array}; \\
 Y_{п2}' &= \begin{array}{c|cccc} & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 3 & 0,24 & -0,10 & -0,02 & -0,12 \\ 4 & -0,10 & 0,16 & -0,06 & 0 \\ 5 & -0,02 & -0,06 & 0,18 & -0,10 \\ 6 & -0,12 & 0 & -0,10 & 0,22 \end{array}; & Y_{п2}'' &= \begin{array}{c|cccc} & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 3 & -0,60 & 0,30 & 0,14 & 0,16 \\ 4 & 0,30 & -0,38 & 0,08 & 0 \\ 5 & 0,14 & 0,08 & -0,42 & 0,20 \\ 6 & 0,16 & 0 & 0,20 & -0,36 \end{array}; \\
 Y_{п3}' &= \begin{array}{c|ccc} & 5 & 7 & 8 \\ \hline 5 & 0,12 & -0,10 & -0,02 \\ 7 & -0,10 & 0,22 & -0,12 \\ 8 & -0,02 & -0,12 & 0,14 \end{array}; & Y_{п3}'' &= \begin{array}{c|ccc} & 5 & 7 & 8 \\ \hline 5 & 0,44 & 0,30 & 0,14 \\ 7 & 0,30 & -0,46 & 0,16 \\ 8 & 0,14 & 0,16 & -0,30 \end{array}.
 \end{aligned}$$

Матрицы узловых сопротивлений подсистем, рассчитанные относительно своих балансирующих узлов по току, равны:

$$Z_1' = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 0,76 & 0,25 & 0,38 \\ 2 & 0,25 & 1,10 & 0,90 \\ 3 & 0,38 & 0,90 & 2,32 \end{array} \end{array};$$

$$Z_2' = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 4 & 5 & 6 \\ 4 & 0,92 & 0,10 & 0,09 \\ 5 & 0,10 & 1,17 & 0,75 \\ 6 & 0,09 & 0,75 & 1,70 \end{array} \end{array};$$

$$Z_3' = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & 7 & 8 \\ 7 & 0,80 & 0,18 \\ 8 & 0,18 & 1,20 \end{array} \end{array};$$

$$Z_1'' = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2,31 & 1,62 & 1,85 \\ 2 & 1,62 & 3,34 & 2,78 \\ 3 & 1,85 & 2,78 & 5,16 \end{array} \end{array};$$

$$Z_2'' = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 4 & 5 & 6 \\ 4 & 2,42 & 0,76 & 0,40 \\ 5 & 0,76 & 2,93 & 1,49 \\ 6 & 0,40 & 1,49 & 2,78 \end{array} \end{array};$$

$$Z_3'' = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & 7 & 8 \\ 7 & 2,36 & 1,49 \\ 8 & 1,49 & 3,64 \end{array} \end{array};$$

После наращивания схемы обобщенного дерева, вычисления матрицы  $Z_{(M)}$  и исключения узлов связи получим искомую матрицу узловых сопротивлений эквивалентной схемы в виде:

$$Z_1' = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} & 1 & 2 & 4 & 6 & 7 & 8 \\ 1 & 0,76 & 0,25 & 0,38 & 0,38 & 0,38 & 0,38 \\ 2 & 0,25 & 1,10 & 0,90 & 0,90 & 0,90 & 0,90 \\ 4 & 0,38 & 0,90 & 3,24 & 2,41 & 2,42 & 2,42 \\ 6 & 0,38 & 0,90 & 2,41 & 4,02 & 3,07 & 3,07 \\ 7 & 0,38 & 0,90 & 2,42 & 3,07 & 4,29 & 3,67 \\ 8 & 0,38 & 0,90 & 2,42 & 3,07 & 3,67 & 4,68 \end{array} \end{array}; \quad Z_1'' = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} & 1 & 2 & 4 & 6 & 7 & 8 \\ 1 & 2,31 & 1,62 & 1,85 & 1,85 & 1,85 & 1,85 \\ 2 & 1,62 & 3,34 & 2,78 & 2,78 & 2,78 & 2,78 \\ 4 & 1,85 & 2,78 & 7,58 & 5,56 & 5,92 & 5,92 \\ 6 & 1,85 & 2,78 & 5,56 & 7,94 & 6,66 & 6,66 \\ 7 & 1,85 & 2,78 & 5,92 & 6,66 & 10,45 & 9,59 \\ 8 & 1,85 & 2,78 & 5,92 & 6,66 & 9,59 & 11,74 \end{array} \end{array};$$

В частном случае, когда подсистемы представляют собой ветви электрической сети, общие правила эквивалентирования схемы вырождаются в известную в электротехнике формулу определения общего сопротивления  $z_{\text{общ}}$  при последовательном соединении ветвей

$$z_{\text{общ}} = \sum_{k=1}^M z_k. \quad (9)$$

В качестве примера рассмотрим часть схемы электрической сети, где три ветви соединены последовательно между узлами 1 и 4 через узлы связи 2 и 3. Сопротивления ветвей  $z_1$ ,  $z_2$  и  $z_3$  заданы. В качестве базисного выбран узел 1, и он является балансирующим узлом по току для первой ветви. Для остальных ветвей балансирующие узлы по току соответственно равны 2 и 3.

Матрицы узловых сопротивлений для отдельных ветвей представляют собой элементы, равные величинам  $z_1$ ,  $z_2$  и  $z_3$ . После наращивания схемы матрица  $Z_d$  имеет вид

$$Z_d = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 2 & 3 & 4 \\ 2 & z_1 & z_1 & z_1 \\ 3 & z_1 & (z_1 + z_2) & (z_1 + z_2) \\ 4 & z_1 & (z_1 + z_2) & (z_1 + z_2 + z_3) \end{array} \end{array};$$

После исключения строк и столбцов, соответствующих узлам связи 2 и 3, получим искомую матрицу  $Z_{(M)}$  в виде

$$Z_{(M)} = \begin{array}{c} \begin{array}{c} 4 \\ (z_1 + z_2 + z_3) \end{array} \end{array};$$

Откуда имеем

$$z_{\text{общ}} = z_1 + z_2 + z_3.$$

### ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены вопросы эквивалентирования схемы большой электроэнергетической системы, когда подсистемы связаны между собой различным способом: параллельно, радиально и последовательно, и сформулированы общие правила формирования полной матрицы проводимостей узлов и матрицы узловых сопротивлений эквивалентной части схемы БЭЭС.

2. При параллельном соединении подсистем БЭЭС полная матрица проводимостей узлов эквивалентной части схемы равна сумме расширенных полных матриц проводимостей отдельных подсистем. При радиальном и последовательном соединениях подсистем БЭЭС матрица узловых сопротивлений эквивалентной части схемы определяется путем наращивания схемы обобщенного дерева, радиально отходя от базисного узла, и исключения строк и столбцов, соответствующих узлам связи подсистем.

3. Известные в электротехнике формулы для определения общей проводимости при параллельном соединении ветвей электрической сети и общего сопротивления при последовательном соединении ветвей являются частным случаем полученных общих правил эквивалентирования схемы БЭЭС.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гераскин О. Т. Основы теории и методов расчета режимов больших электроэнергетических систем. — М.: ИПК госслужбы, 1996. — 166 с.
2. Гераскин О. Т. Методы диакоптики для расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем // Изв. РАН. Энергетика. — 1997. — № 6. — С. 11—20.
3. Гераскин О. Т. Обобщенный закон Ома для подсистем БЭЭС // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1998. — № 3. — С. 3—16.
4. Гераскин О. Т. Обобщение первого закона Кирхгофа и формирование уравнений узловых напряжений в больших электроэнергетических системах // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1998. — № 6. — С. 3—9.
5. 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. — № 4. — С. 3—16.

Представлена кафедрой  
эксплуатации электрических станций,  
сетей и систем

Поступила 23.11.1999