

## Построение z-диакоптической матрицы с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов

Бадалян Н.П., д-р техн. наук, Хачатрян К.В., канд. техн. наук

Рассмотрен вопрос построения Z-диакоптической матрицы, используемой для решения режимных вопросов электроэнергетических систем, с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов, функционирующих в отдельных ветвях схемы замещения.

*Ключевые слова:* электроэнергетическая система, диакоптика, узел, матрица, радиально связанные подсистемы, коэффициент трансформации.

### Modelling of Z-diaoptical Matrix with regard for Complex Transformation Factors of Transformer

N.P. Badalyan, Doctor of Engineering, K.V. Khachatryan, Candidate of Engineering

The question of modeling of the Z-diaoptical matrix with regard for complex transformation factor of transformer, functioning in separate branch of the scheme replacement is considered.

*Key words:* electroenergetic system, diaoptical, node, matrix, radial bound subsystems, turn ratio.

В настоящее время для решения режимных вопросов электроэнергетических систем (ЭЭС) широко используются диакоптические методы [1–9], в которых исходным является построение Z-диакоптической матрицы.

Z-диакоптическая матрица представляется в следующем виде:

$$\begin{array}{|c|c|c|}
 \hline
 \mathbf{Z}_{i_1j_1} & & \Delta\mathbf{Z}_{i_1l} \\
 \hline
 & \mathbf{Z}_{i_2j_2} & \Delta\mathbf{Z}_{i_2l} \\
 \hline
 & & \vdots \\
 \hline
 & & \mathbf{Z}_{i_Nj_N} \\
 \hline
 & & \Delta\mathbf{Z}_{i_Nl} \\
 \hline
 & & \Delta\mathbf{Z}_{l1} + \mathbf{Z}_l \\
 \hline
 \end{array} \quad (1)$$

где  $i, j$  – индексы соответствующих подсистем;  $l$  – удаленные ветви.

При построении (1) предполагается, что исследуемая ЭЭС представлена как совокупность радиально связанных  $M$  подсистем, полученных путем удаления определенного количества ветвей. Также предполагается, что число узлов отдельных подсистем соответственно составляет  $1 + M_1, M_2, \dots, M_N$ . Таким образом, число независимых узлов будет равно  $M_1 + M_2 + \dots + M_N = M$ . (2)

Затем строится расчетная электрическая схема замещения, на основании которой строится Y-квазидиагональная матрица как совокупность Y подматриц радиально связанных подсистем.

Имея Y-квазидиагональную матрицу, строим Z-квазидиагональную матрицу как совокупность Z подматриц радиально связанных подсистем.

Пользуясь Z-квазидиагональной матрицей, строим Z-диакоптическую расчетную матрицу [1, 6, 7, 9], которая, как было сказано, имеет вид (1).

Необходимо отметить, что подматрица собственных и взаимных сопротивлений  $Z_{i_1j_1}$  составляется относительно единственного базисного узла (БУ).

Подматрица  $Z_{i_2j_2}$  составляется относительно граничного узла первой подсистемы. Подматрица последней N подсистемы  $Z_{i_Nj_N}$  составляется относительно граничного узла предпоследней подсистемы.

После построения квазидиагональной матрицы  $Z_{ij}$  ( $Z_{i_1j_1}, Z_{i_2j_2}, \dots, Z_{i_Nj_N}$ ) строится вспомогательная подматрица  $\Delta Z_{il}$  ( $\Delta Z_{i_1l}, \Delta Z_{i_2l}, \dots, \Delta Z_{i_Nl}$ ), число столбцов которой характеризуется числом удаленных ветвей.

Число строк подматриц  $\Delta Z_{i_1l}, \Delta Z_{i_2l}, \dots, \Delta Z_{i_Nl}$  характеризуется числом узлов отдельных подсистем.

Каждый столбец подматрицы  $\Delta Z_{il}$  ( $\Delta Z_{i_1l}, \Delta Z_{i_2l}, \dots, \Delta Z_{i_Nl}$ ) определяется разностью двух столбцов матрицы  $Z_{ij}$  ( $Z_{i_1j_1}, Z_{i_2j_2}, \dots, Z_{i_Nj_N}$ ), номера которых совпадают с номерами тех узлов, между которыми находились удаленные ветви.

Затем строится подматрица  $\Delta Z_l$ , каждая строка которой определяется разностью двух строк подматрицы  $\Delta Z_{il}$  ( $\Delta Z_{i_1l}, \Delta Z_{i_2l}, \dots, \Delta Z_{i_Nl}$ ), номера которых совпадают с номерами тех узлов, между которыми находились удаленные ветви.

Важным является то, что перед тем, как построить подматрицы  $\Delta Z_l$ , необходимо к элементам по столбцам каждой последующей подматрицы прибавить последнюю строку каждой предыдущей подматрицы. К диагональным элементам подматрицы  $\Delta Z_l$  прибавляются диагональные элементы матрицы  $Z_l$ , которые являются комплексными сопротивлениями удаленных ветвей, чем и завершается построение расчетной диакоптической матрицы Z [1, 6, 7, 9] с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов.

Для иллюстрации предложенного алгоритма рассмотрим схему замещения одной ЭЭС (рис. 1). Рассматриваемая схема ЭЭС состоит из десяти узлов, причем пять узлов являются стационарными узлами и пять узлов – нагрузочными. Схема замещения состоит из 15 продольных ветвей, которые показаны в виде прямоугольников, внутри которых приводятся их комплексные сопротивления.

Как нетрудно заметить, в ветвях 4–5 и 5–6 функционируют трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации.

С учетом внутренних сопротивлений трансформаторов, функционирующих в ветвях 4–5 и 5–6, схему замещения исследуемой ЭЭС (рис. 1) удобно представить в виде схемы, показанной на рис. 2.

После удаления ветвей 1–6, 2–5 и 4–9, в которых не функционируют трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации, исследуемую схему удобно представить как совокупность трех радиально связанных подсистем, как это показано на рис. 3.

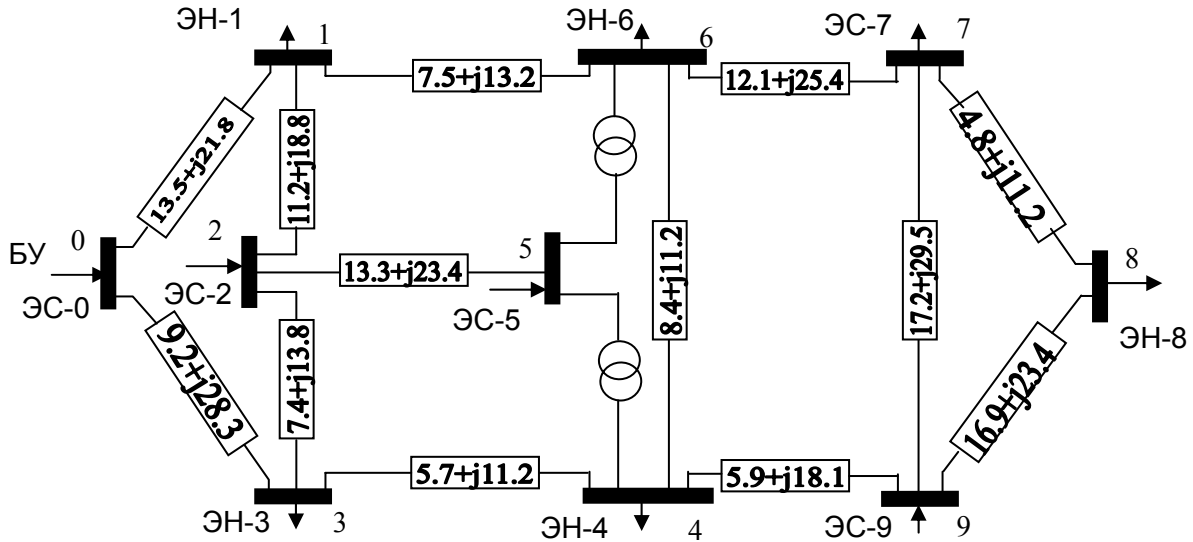


Рис. 1. Заданная схема исследуемой ЭЭС: ЭН – электрическая нагрузка; ЭЭС – электрическая станция; БУ – базисный узел

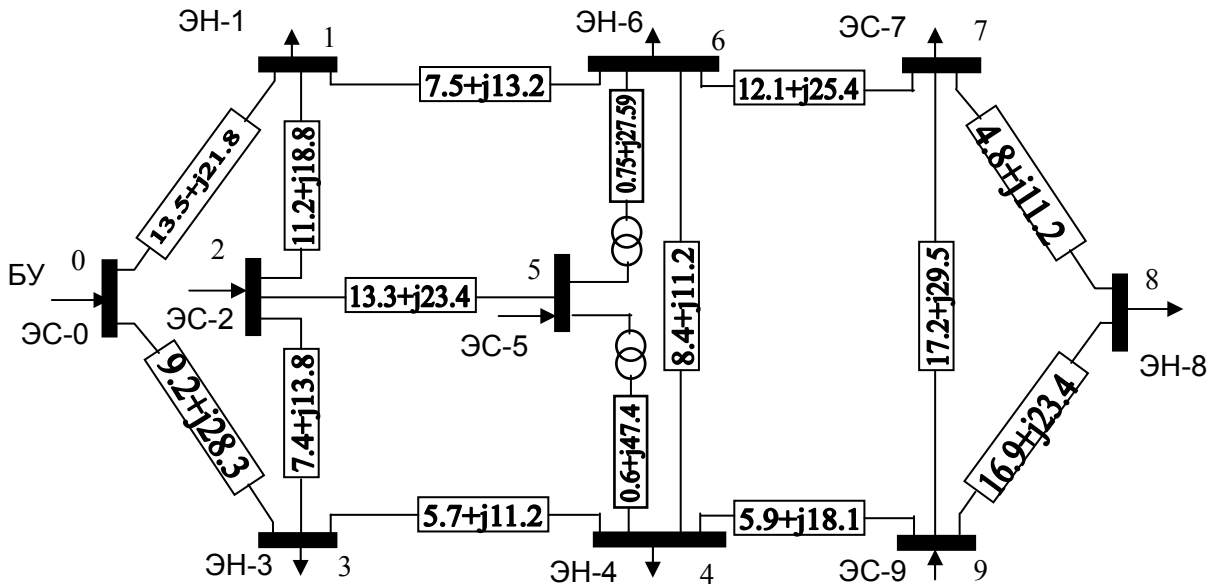


Рис. 2. Схема замещения исследуемой ЭЭС

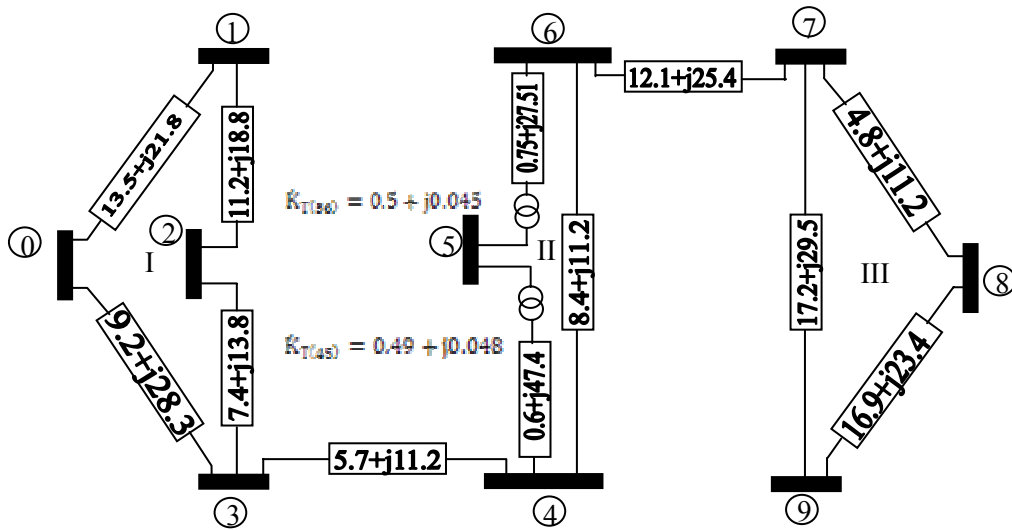


Рис. 3. Схема замещения ЭЭС как совокупность радиально связанных трех подсистем

С учетом сделанных упрощений (рис. 3) составим квадратные матрицы проводимостей отдельных подсистем, объединение которых дает квазидиагональную матрицу узловых проводимостей для радиально связанных подсистем.

Первая подматрица  $Y_I$  первой подсистемы является квадратной неособенной, которая составляется относительно базисного узла.

В данном случае

	1	2	3
1	0,043919– –j0,072414	–0,023387+ +j0,039258	–0+j0
2	–0,023387+ +j0,039258	0,053566– –j0,095538	–0,030179+ +j0,056280
3	–0+j0	–0,030179+ +j0,056280	0,040568– –j0,088238

(3)

Затем составляем матрицу узловых проводимостей других подсистем. В отличие от матрицы  $Y_I$  (рис. 3), матрица  $Y_{II}$  строится с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов, которые функционируют в ветвях 4–5 и 5–6.

В данном случае матрица  $Y_{II}$  имеет следующие численные элементы:

	4	5	6
4			
5		0,000575– –j0,004098	–0,000659+ +j0,018164
6		–0,000332+ +j0,018174	0,043269+ +j0,066821

(4)

Матрица  $Y_{III}$  третьей подсистемы, в которой не функционируют трансформаторы, имеет следующий вид:

	7	8	9
7			
8		0,052310– –j0,103516	–0,020283+ +j0,028085
9		–0,020283+ +j0,028085	0,035033+ –j0,053383

(5)

После обращения матрицы (3)–(5) узловых проводимостей установим матрицы узловых сопротивлений, которые приведены ниже:

	1	2	3
1	9,219520+ +j16,119865	5,650244+ +j11,209785	3,257077+ +j7,384858
2	5,650244+ +j11,209785	10,307211+ +j20,858010	5,925110+ +j14,104810
3	3,257077+ +j7,384858	5,925110+ +j14,104810	7,622149+ +j18,851484

(6)

	4	5	6
4			
5		9,617519+ +j55,632445	5,487321– –j11,664218
6		5,276816– –j11,767895	4,300417– –j9,035506

(7)

	7	8	9
7			
8		4,282590+ +j9,288602	2,095997+ +j5,138435
9		2,095997– –j5,138435	9,604184+ +j15,929466

(8)

Затем строим матрицы узловых сопротивлений отдельных подсистем относительно соответствующих базисных узлов.

Поскольку матрица сопротивлений первой подсистемы построена относительно единственного базисного узла, то она остается без изменения.

Матрицу узловых сопротивлений второй подсистемы необходимо перестроить относительно текущего базисного узла 3 (рис. 3), при этом достаточно ко всем элементам матрицы добавить  $Z_{3-4} = 5,7 + j11,2$ . В результате получим

	4	5	6	
4	5,700000+ +j11,200000	5,700000+ +j11,200000	5,700000+ +j11,200000	
5	5,700000+ +j11,200000	15,317519+ +j66,832445	11,187321- -j0,464218	(9)
6	5,700000+ +j11,200000	10,976816- -j0,567895	10,000417+ +j2,164494	

Затем перестроим матрицу узловых сопротивлений относительно текущего базисного узла 6, при этом необходимо ко всем элементам данной матрицы добавить  $Z_{6-7} = 12,1 + j25,4$ . В результате получим

	7	8	9	
7	12,100000+ +j25,400000	12,100000+ +j25,400000	12,100000+ +j25,400000	
8	12,100000+ +j25,400000	16,382590+ +j34,388602	14,095599+ +j30,538435	(10)
9	12,100000+ +j25,400000	14,095599+ +j30,538435	21,704184+ +j41,329466	

Имея численные значения матрицы узловых сопротивлений трех радиально связанных подсистем, можем построить Z-квазидиагональную матрицу, которая будет иметь следующий вид:

9,219+ +j16,119	5,650+ +j11,2097	3,257+ +j7,384						
5,650+ +j11,209	10,307+ +j20,858	5,925+ +j14,104						
3,257+ +j7,384	5,925+ +j14,104	7,622+ +j18,851						
			5,700+ +j11,200	5,700+ +j11,200	5,700+ +j11,200			
			5,700+ +j11,200	15,317+ +j66,832	11,187- -j0,464			
			5,700+ +j11,200	10,976- -j0,567	10,000+ +j2,164			
						12,100+ +j25,400	12,100+ +j25,400	12,100+ +j25,400
						12,100+ +j25,400	16,3825+ +j34,3886	14,095+ +j30,538
						12,100+ +j25,400	14,0955+ +j30,5384	21,704+ +j41,329

Пользуясь вышеприведенным алгоритмом, строим Z-диакоптическую матрицу, которая с численными элементами будет иметь следующий вид:

	1	2	3		1-6	2-5	4-9		
	9,219+ +j16,119	5,650+ +j11,2097	3,257+ +j7,384		5,9624+ +j8,7350	2,3931+ +j3,8249	0,0000+ +j0,0000		
	5,650+ +j11,209	10,307+ +j20,858	5,925+ +j14,104		-0,2748- -j2,8950	4,3821+ +j6,7532	0,0000+ +j0,0000		
	3,257+ +j7,384	5,925+ +j14,104	7,622+ +j18,851		-4,3650- -j11,4666	-1,6970- -j4,7466	0,0000+ +j0,0000		
				4	5	6			
				5,700+ +j11,200	5,700+ +j11,200	5,700+ +j11,200			
				5,700+ +j11,200	15,317+ +j66,832	11,187- -j0,464			
				5,700+ +j11,200	10,976- -j0,567	10,000+ +j2,164			
							7	8	9
							12,100+ +j25,400	12,100+ +j25,400	12,100+ +j25,400
							12,100+ +j25,400	16,382+ +j34,388	14,095+ +j30,538
							12,100+ +j25,400	14,095+ +j30,538	21,704+ +j41,329
							0,0000+ +j0,0000	0,0000+ +j0,0000	-12,1000- -j25,4000
							0,0000+ +j0,0000	0,0000+ +j0,0000	-14,0955- -j30,5384
							0,0000+ +j0,0000	0,0000+ +j0,0000	-21,7041- -j41,3294
							27,8279+ +j31,2371	15,0670+ +j8,0037	4,3004+ +j9,0355
							15,3272+ +j19,4707	34,6966+ +j101,7323	5,4373+ +j11,6642
							15,2775+ +j13,0308	21,3366+ +j10,9319	31,9045+ +j68,4649

Можно заметить, что подматрица ( $\Delta Z_{\Gamma} + Z_{\Gamma}$ ) является несимметричной относительно главной диагонали в результате наличия в ветвях трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации.

### Заключение

Для построения  $Z$ -диакоптической матрицы с использованием  $Y$ -матрицы комплексных проводимостей при наличии в отдельных ветвях трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации ЭЭС удобно представить в виде радиально связанных подсистем.

### Список литературы

1. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П.** Расчет установившегося режима большой электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество. – 2003. – № 6. – С. 13–17.
2. **Хачатрян К.В.** Диакоптический метод коррекции установившегося режима большой электроэнергетической системы // Изв. вузов и энергетических объединений стран СНГ. Энергетика. – 2004. – № 5. – С. 48–52.

3. **Хачатрян К.В.** Метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество. – 2005. – № 5. – С. 8–11.

4. **Формирование** расчетных схем для анализа режимов электроэнергетических систем / Н.В. Гончарюк, С.Ф. Мокаров, П.Я. Кау и др. // Электричество. – 2006. – № 7. – С. 2–16.

5. **Обобщенная** диакоптическая математическая модель расчета установившегося режима большой электроэнергетической системы / В.С. Хачатрян, Н.П. Бадалян, К.В. Хачатрян, С.Э. Григорян // Электричество. – 2006. – № 10. – С. 19–27.

6. **Расчет** и коррекция  $Y$  пассивных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов / В.С. Хачатрян, К.В. Хачатрян, С.Э. Григорян и др. // Вестник НАА. – 2007. – Т. 4. – № 4. – С. 542–549.

7. **Метод** построения  $Y$  матрицы обобщенных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов / В.С. Хачатрян, К.В. Хачатрян, С.Э. Григорян и др. // Вестник ИАА. – 2007. – Т. 4. – № 3. – С. 340–349.

8. **Оптимизация** режима большой электроэнергетической системы методом декомпозиции по активным мощностям электрических станций / В.С. Хачатрян, М.А. Мнацаканян, К.В. Хачатрян, С.Э. Григорян // Электричество. – 2008. – № 10. – С. 10–22.

9. **Построение** и коррекция  $Z$  матрицы обобщенных параметров электрической сети с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов / В.С. Хачатрян, Н.П. Бадалян, К.В. Хачатрян и др. // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2008. – Т. 61. – № 1. – С. 34–46.

*Бадалян Норайр Петикович,*  
ГОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярёва»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электротехники,  
e-mail: norayrbadalyan@mail.ru

*Хачатрян Карен Варосович,*  
Государственный инженерный университет Армении,  
кандидат технических наук,  
e-mail: norayrbadalyan@mail.ru

**10.**