

# Влияние несимметрии параметров двухцепной воздушной линии электропередачи на установившиеся режимы

ШИШКОВ Е.М. ВЕДЕРНИКОВ А.С., ГОЛЬДШТЕЙН В.Г.

*Приведена разработанная авторами математическая модель в фазных координатах двухцепных воздушных линий электропередачи. Предложена методика расчета установившегося режима в фазных координатах. Приведен пример расчета электрических потерь в двухцепной линии с использованием разработанной методики. Проведено сопоставление результатов расчета различными методами.*

**Ключевые слова:** линия электропередачи, установившийся режим, метод фазных координат, схема замещения, электрические потери

В экономике страны важнейшая роль принадлежит электроэнергетической отрасли, во многом определяющей в настоящее время состояние экономики страны. Инновационное развитие отрасли на современном этапе в значительной мере определяют важнейшие направления – энергоэффективность и энергосбережение в основных технологических процессах, таких как производство, передача, распределение и потребление электроэнергии. Поэтому задачи инновационного развития электросетевого комплекса, напрямую связанные с его надежностью, энергоэффективностью и энергосберегающими процессами и оборудованием, имеют наивысшие приоритетные оценки как в отрасли, так и в целом в электроэнергетике. Их объединяет общее определение проблемы, озвученное федеральным и отраслевым руководством как создание «умных» активно-адаптивных сетей (ААС). Необходимо отметить, что, несмотря на внешнее отличие надежности, энергоэффективности и энергосбережения как основных ингредиентов развития электроэнергетики, они неразрывно связаны единством и идеологией построения ААС или, как их еще называют теперь, интеллектуальных сетей.

Среди проблем создания этих сетей на ряде федеральных и отраслевых форумов и совещаний выделена проблема получения новых научных знаний в части разработки новых и уточнения существующих традиционных методов анализа, исследований и рекомендаций по усовершенствованию эксплуатации электросетевого комплекса.

Это полностью относится к таким специфическим электроустановкам (ЭУ), как двухцепные воздушные линии (ДВЛ) электропередачи. Повышение их энергоэффективности и надежности является

*The paper presents the mathematical model in phase coordinates of a double-circuit overhead power transmission lines. A methodology for calculation of steady-state conditions in phase coordinates is proposed. Example of calculation of electrical losses in a double-circuit power transmission line using proposed methodology is presented. A comparison of calculation results obtained using different methods is given.*

**Key words:** power transmission line, steady-state condition, phase-coordinate method, equivalent circuit, electrical losses

важной научно-технической проблемой. Ее репрезентативные и адекватные решения требуются в разнообразных задачах проектирования, оперативного и диспетчерского управления режимами в электрических сетях различных классов напряжений. ДВЛ как наиболее распространенные многоцепные линии электропередачи составляют до 25, 30% общего числа воздушных линий.

Специфику ДВЛ и электромагнитных процессов в них во многом определяет компактность конструкции, т.е. малые расстояния между всеми фазными проводниками и тросами цепей. Физическим отражением этого являются значительные электромагнитные взаимные связи цепей (ВСЦ) и их составляющих. С точки зрения трехфазного построения технологий, оборудования и режимов в электрических системах это определяет их несимметрию по внутренним параметрам и параметрам режимов, значительно более сложную в сравнении с одноцепными ВЛ.

Однако в большинстве случаев при моделировании трехфазных объектов и составленных из них комплексов (что и представляют собой ДВЛ) и процессов в них допущение о симметрии является традиционным и общепринятым. Его с целью упрощения определения параметров их режимов используют практически все методы расчета и большинство программных комплексов анализа установившихся и разнообразных неустановившихся [1–3] режимов (вплоть до кратковременных импульсных). В них расчетные эквивалентные схемы, исходные данные и результаты расчета в том или ином виде формируются на основе однофазного представления, поскольку для остальных фаз при-

нимается или симметричный сдвиг, или идентичность процессов.

Так, в частности, построен и общеизвестный метод симметричных составляющих, предназначенный для расчета параметров несимметричных трехфазных режимов, но по гипотетическим симметричным эквивалентным схемам отдельных последовательностей, построенным также на одну фазу.

При широком применении современных средств оценки параметров режимов и учета электроэнергии для ДВЛ становится все более очевидной несостоятельность допущений о симметрии и пренебрежении в ряде случаев ВСЦ, что подтверждается многочисленными данными физического анализа и эксплуатации.

С другой стороны, в настоящее время в связи с масштабным распространением положений и принципов реализации интеллектуальных электрических сетей (ИЭС) и систем электроснабжения, содержащих, в частности, ДВЛ, необходимо системное ограничение погрешностей и допущений при моделировании их стационарных и переходных режимов работы.

Установившиеся режимы (УР) ВЛ традиционно анализируются без учета взаимного влияния соседних проводов, тросов и цепей (для двухцепных линий), а также земли и, самое главное, принципиальной несимметрии одноцепных и особенно двухцепных линий. Однако в современных условиях требования к точности расчетов УР стали намного жестче в связи с появлением ряда практических задач, связанных с учетом электроэнергии, повышением пропускной способности за счет использования внутренних свойств двухцепных ВЛ и прогнозирования режимов их работы при значительной разнице в их загрузке и др.

Общепризнанным подходом в решении практических задач анализа режимов в электрических сетях является использование в качестве основополагающей концепции математического описания соответствующих физических процессов с помощью уравнений Максвелла для электромагнитных полей. Возникающие при этом методические проблемы решаются с помощью рекомендаций, данных в фундаментальной работе [4]. В большинстве случаев их общая идея — переход от так называемой «полевой» постановки задачи к реализации соответствующих «эквивалентных» электрических схем. При этом определение параметров этих схем проводится с помощью приближенных интегральных решений соответствующей части «полевой» задачи, а электростатические и электромагнитные процессы моделируются отдельно, что приводит, соот-

ветственно, к возникновению П- или Т-образных схем замещения [2, 3].

Таким образом, решение задачи расчета режима ДВЛ состоит из следующей последовательности действий.

1. Построение эквивалентной многопроводной схемы замещения и определение её параметров.

2. Составление уравнений электрического состояния для сформированной схемы замещения.

В ДВЛ как в объекте с распределенными параметрами *единый электромагнитный процесс* квазистационарного УР состоит из взаимосвязанных *продольного электромагнитного и поперечного электростатического процессов*. В расчетной модели они приближенно отображаются в виде *общей МСЗ с сосредоточенными параметрами* в виде объединения продольных и поперечных парциальных схем, *сформированных отдельно*, как это делается, например, в П-образной схеме замещения одноцепной линии электропередачи.

Для того чтобы применять МСЗ в общепринятом виде для расчета режима несимметричной ДВЛ, необходимо определить следующие условия и весьма существенные допущения [5–7].

Двухцепная воздушная линия с числом проводов от 6 до 8 с учетом заземленных и незаземленных грозозащитных тросов может быть представлена МСЗ.

Электромагнитная связь между проводами и цепями ДВЛ приближенно учитывается значениями взаимных индуктивностей и емкостей.

Учет собственных емкостей цепей и емкости взаимной связи проводится по общим традиционным принципам расчета УР [2, 3], т.е. при построении расчетной эквивалентной схемы замещения поперечные емкости (фазные на землю, междуфазные и междуцепные) задаются половинными значениями по концам ДВЛ, а продольные — не учитываются.

Для решения задачи используется идеология метода расчета режима линии электропередачи по данным, заданным в начале линии.

Параметры режима по цепям могут отличаться как по значению, так и по направлению, поэтому в соответствующих одноименных или разных узлах ДВЛ задаются трехфазные равные или неравные по значению нагрузки и напряжения в источниках питания.

Последнее означает, что известна трехфазная система напряжений на общих шинах ДВЛ или отдельно по цепям за предвключенным трехфазным реактивным сопротивлением, приближенно определенным по [1]. Нагрузки моделируются по известной методике [3] в виде постоянных комплекс-

ных трехфазных сопротивлений. Их приближенные значения при необходимости можно уточнить в итерационном процессе расчета параметров режима ДВЛ.

Проведенный анализ показал, что для реализации цели данной работы целесообразно использовать теорию четырехполюсников [2, 3]. Для этого представим ДВЛ в виде (рис. 1) обобщенного четырехполюсника (ОЧП). Для наиболее частого варианта конфигурации ДВЛ с одним грозозащитным тросом узлы начала и конца (Н–К) проводов цепей ДВЛ обозначены в соответствии с табл. 1, где приведены условные обозначения входов и выходов ОЧП, а именно: одной цепи ДВЛ –  $A, B, C$ , второй цепи –  $a, b, c$  и троса –  $T$ . Кроме того, для формализации дальнейших преобразований введем для этих узлов последовательные номера, которые также приведены в этой табл. 1.

Таблица 1

1	2	3	4	5	6	7
$A_H - A_K$	$B_H - B_K$	$C_H - C_K$	$a_H - a_K$	$b_H - b_K$	$c_H - c_K$	$T_H - T_K$
1–2	3–4	5–6	7–8	9–10	11–12	13–14

Для ДВЛ это позволяет построить общий вид МСЗ, представленный на рис. 1. В соответствии с принятой концепцией раздельного моделирования продольных и поперечных процессов в ДВЛ рассмотрим определение параметров МСЗ.

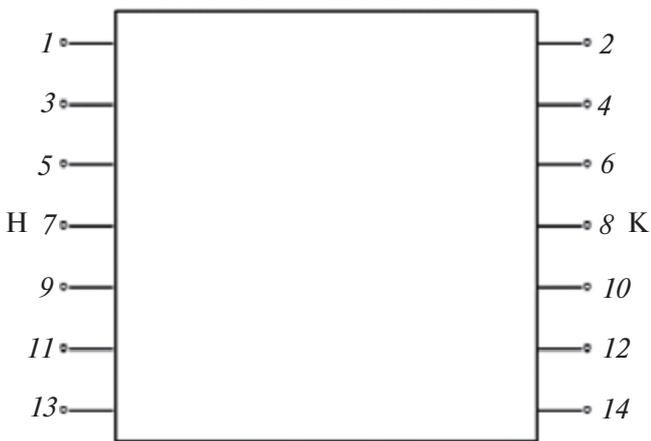


Рис. 1. Общий вид МСЗ для ДВЛ (Н и К – обобщенные вход и выход ОЧП)

Продольные собственные и взаимные активно-индуктивные сопротивления исходно моделируются в эквивалентной МСЗ для расчета режима ДВЛ в естественном виде комплексных сопротивлений по справочным данным и известным формулам [2, 3]:

$$\underline{Z}_{kk} = \underline{Z}_{0k}l; \tag{1}$$

$$\underline{Z}_{ik} = \underline{Z}_{0ik}l, \tag{2}$$

где  $k, i$  – условные номера проводов и тросов в соответствии с табл. 1;  $\underline{Z}_{0k}$  – фазное комплексное сопротивление одного провода или троса ДВЛ (на единицу длины);  $\underline{Z}_{0ik}$  – комплексное взаимное сопротивление между любыми проводами цепей или тросов, рассчитанное по значениям  $d_{ik}$  и  $D_{ik}$  между проводами и их зеркальными отображениями в земле (на единицу длины).

Модель, построенная в соответствии с рис. 2 и формулами (1) и (2), может быть названа продольной частью эквивалентной схемы ДВЛ в Z-форме.

Поперечная составляющая МСЗ исходно формируется из собственных и взаимных емкостей, которые определяются по справочным данным и известным формулам [2, 3]:

$$C_{kk} = C_{0k}l; \tag{3}$$

$$C_{ik} = C_{0ik}l, \tag{4}$$

где  $C_{0k}$  – емкость каждого провода и троса ДВЛ (на единицу длины);  $C_{0ik}$  – взаимная емкость между проводами  $k$  и  $i$  (на единицу длины), рассчитанная по значениям  $d_{ik}$  и  $D_{ik}$  между проводами и их зеркальными отображениями (в узлы начала и конца проводов и тросов ДВЛ по общепринятым правилам [2, 3] в МСЗ включаются половины этих емкостей).

На рис. 3 поперечная часть МСЗ представлена в сокращенном виде условными связями только для фазы  $A$  и троса  $T$  из-за практической невозможности графического отображения всех аналогичных связей.

Анализ показывает, что Z-форма позволяет естественным образом в виде падений напряжения учитывать взаимные индуктивные процессы. Одна-

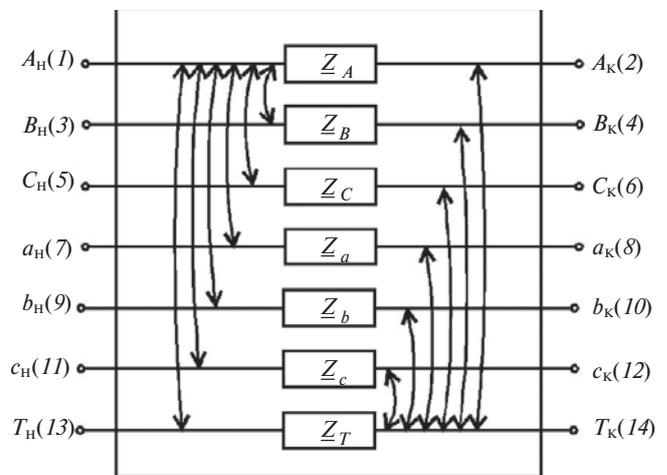


Рис. 2. Продольная часть эквивалентной схемы ДВЛ в Z-форме, состоящая из комплексных сопротивлений с взаимными индуктивными связями фазы  $A$  и троса  $T$

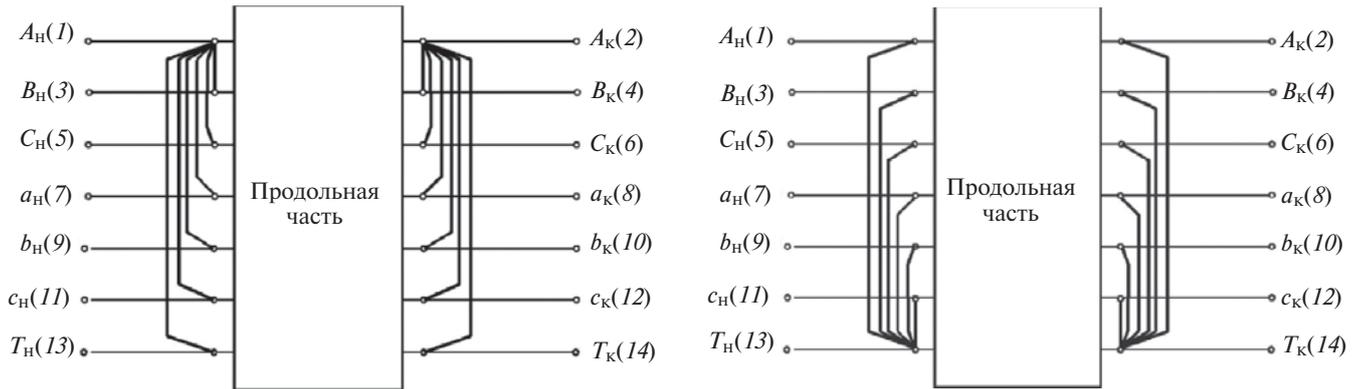


Рис. 3. Поперечная часть эквивалентной схемы ДВЛ, состоящая из емкостных проводимостей, одинаковая в Z- и Y-формах и показанная в виде условных связей для фазы A и троса T

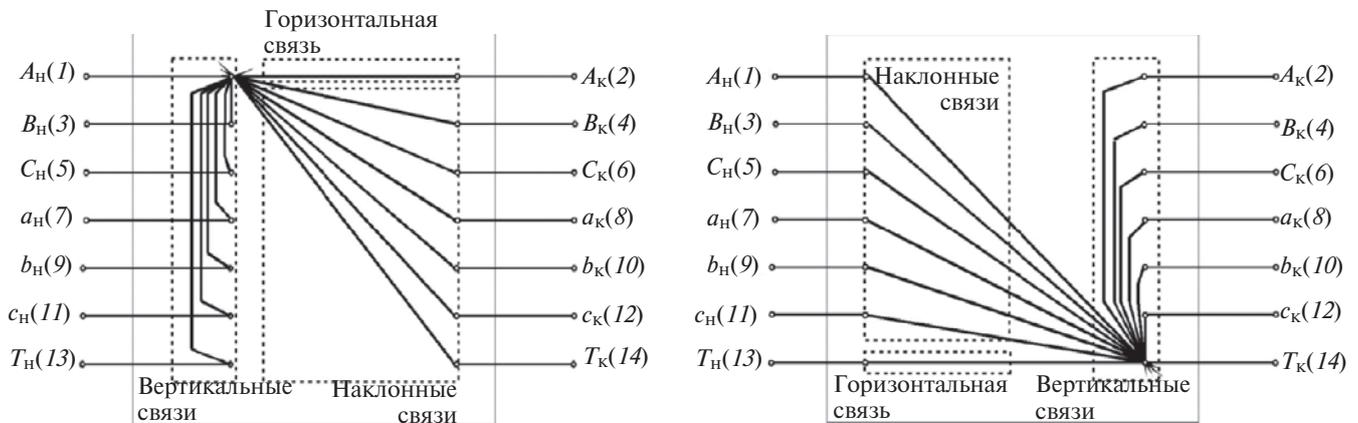


Рис. 4. Продольная часть эквивалентной схемы ДВЛ в Y-форме, состоящая из кондуктивных комплексных сопротивлений (проводимостей) фазы A и троса T

ко она неудобна для дальнейшего использования из-за необходимости построения систем уравнений по II закону Кирхгофа или по методу контурных токов, которые практически не применяются в расчетах УР. Она плохо стыкуется с общепринятыми узловыми способами задания нагрузок, взаимных и собственных емкостей ДВЛ [2, 3], а также мощностей, напряжений и токов источников питания.

Поэтому в качестве расчетной целесообразно использовать продольную часть эквивалентной схемы ДВЛ, представленную на рис. 3 и получившую название Y-формы. Она по определению эквивалентна Z-форме по входным и выходным токам и напряжениям в узлах 1–14, и в ней нет взаимных индуктивных связей, которые эквивалентируются кондуктивными комплексными проводимостями (сопротивлениями).

На рис. 4 продольная часть представлена по аналогии с рис. 3 в сокращенном виде. Здесь показаны все продольные активно-индуктивные сопротивления проводов и тросов ДВЛ, а взаимные со-

противления – только для одного провода фазы A и одного троса T1.

Очевидно, что поперечная составляющая эквивалентной схемы в Y-форме (рис. 3) такая же, как в Z-форме (рис. 2). Следовательно Y-форма отвечает требованиям использования метода узловых напряжений для расчета режимов ДВЛ [2, 3].

Параметры продольной составляющей эквивалентной схемы в Y-форме (рис. 3) можно определить по методике перехода [4, 5] от Z-формы к Y-форме схем замещения для произвольного числа ветвей, имеющих взаимные индуктивные связи.

Для этого запишем для продольной части схемы рис. 1 уравнения ее состояния, которые представляют собой систему комплексных алгебраических уравнений, составленную по закону Ома для вектора  $\underline{DU}$  падений напряжений от протекания токов ветвей  $I$  в виде [5]:

$$\underline{DU} = \underline{ZI}. \quad (5)$$

Раскроем данные матричные выражения, применяя обозначения табл. 1:

$DU_{AH- AK}$	=	$Z_{A,A}$	$Z_{A,B}$	$Z_{A,C}$	$Z_{A,a}$	$Z_{A,b}$	$Z_{A,c}$	$Z_{A,T1}$	,	$I_A$
$DU_{BH- BK}$		$Z_{B,A}$	$Z_{B,B}$	$Z_{B,C}$	$Z_{B,a}$	$Z_{B,b}$	$Z_{B,c}$	$Z_{B,T1}$		$I_B$
$DU_{CH- CK}$		$Z_{C,A}$	$Z_{C,B}$	$Z_{C,C}$	$Z_{C,a}$	$Z_{C,b}$	$Z_{C,c}$	$Z_{C,T1}$		$I_C$
$DU_{ah- ak}$		$Z_{a,A}$	$Z_{a,B}$	$Z_{a,C}$	$Z_{a,a}$	$Z_{a,b}$	$Z_{a,c}$	$Z_{a,T1}$		$I_a$
$DU_{bh- bk}$		$Z_{b,A}$	$Z_{b,B}$	$Z_{b,C}$	$Z_{b,a}$	$Z_{b,b}$	$Z_{b,c}$	$Z_{b,T1}$		$I_b$
$DU_{ch- ck}$		$Z_{c,A}$	$Z_{c,B}$	$Z_{c,C}$	$Z_{c,a}$	$Z_{c,b}$	$Z_{c,c}$	$Z_{c,T1}$		$I_c$
$DU_{Th- Tk}$		$Z_{T1,A}$	$Z_{T1,B}$	$Z_{T1,C}$	$Z_{T1,a}$	$Z_{T1,b}$	$Z_{T1,c}$	$Z_{T1,T1}$		$I_{T1}$

(6)

Здесь диагональные  $Z_{i,i}$  и внедиагональные  $Z_{i,j}$  элементы матрицы  $Z$  представляют собственные и взаимные активно-индуктивные сопротивления ветвей ДВЛ в соответствии с рис. 2. Обращая матрицу  $Z$ , получаем матрицу проводимостей ветвей  $Y$  и, соответственно, систему уравнений состояния продольной части ДВЛ, разрешенную относительно токов ветвей  $I$  в матричном и алгебраическом виде:

$$\underline{I} = \underline{Y} \underline{D} \underline{U}; \tag{7}$$

$I_A$	=	$Y_{A,A}$	$Y_{A,B}$	$Y_{A,C}$	$Y_{A,a}$	$Y_{A,b}$	$Y_{A,c}$	$Y_{A,T1}$	,	$DU_{AH- AK}$
$I_B$		$Y_{B,A}$	$Y_{B,B}$	$Y_{B,C}$	$Y_{B,a}$	$Y_{B,b}$	$Y_{B,c}$	$Y_{B,T1}$		$DU_{BH- BK}$
$I_C$		$Y_{C,A}$	$Y_{C,B}$	$Y_{C,C}$	$Y_{C,a}$	$Y_{C,b}$	$Y_{C,c}$	$Y_{C,T1}$		$DU_{CH- CK}$
$I_a$		$Y_{a,A}$	$Y_{a,B}$	$Y_{a,C}$	$Y_{a,a}$	$Y_{a,b}$	$Y_{a,c}$	$Y_{a,T1}$		$DU_{ah- ak}$
$I_b$		$Y_{b,A}$	$Y_{b,B}$	$Y_{b,C}$	$Y_{b,a}$	$Y_{b,b}$	$Y_{b,c}$	$Y_{b,T1}$		$DU_{bh- bk}$
$I_c$		$Y_{c,A}$	$Y_{c,B}$	$Y_{c,C}$	$Y_{c,a}$	$Y_{c,b}$	$Y_{c,c}$	$Y_{c,T1}$		$DU_{ch- ck}$
$I_{T1}$		$Y_{T1,A}$	$Y_{T1,B}$	$Y_{T1,C}$	$Y_{T1,a}$	$Y_{T1,b}$	$Y_{T1,c}$	$Y_{T1,T1}$		$DU_{Th- Tk}$

(8)

Полученная матрица проводимостей ветвей позволяет построить для ДВЛ с грозозащитным тросом (число проводов  $n=7$ ) эквивалентную схему замещения в виде полного четырнадцатиугольника со всеми диагоналями (рис. 4). Все элементы – связи (всего 91 ветвь) в этом многоугольнике – можно разделить в соответствии с рис. 4 и рекомендациями [5]:

на горизонтальные (1–2; 3–4 и т.д.;  $n=7$  ветвей);

вертикальные (1–3; 5–7 и т.д.;  $n(n-1)=7 \times 6=42$  ветви);

наклонные (1–8; 6–13 и т.д.;  $n(n-1)=7 \times 6=42$  ветви).

Как показывает анализ, для формирования уравнений состояния ДВЛ необходимо использовать табличное представление полной МСЗ в  $Y$ -форме, фрагменты которой представлены на рис. 3. Пользуясь методикой, изложенной в [5], и обозначениями узлов МСЗ, приведенными на рис. 1, сформируем упорядоченную табл. 2 всех ветвей для схемы полного четырнадцатиугольника со всеми диагоналями. Сопоставив элементы табл. 2 с

обозначениями узлов и ветвей табл. 1, сформируем треугольную табл. 3 проводимостей ветвей МСЗ.

Пользуясь данными табл. 2 и 3, можно получить матрицу проводимостей  $Y_{14}$ , используя тот факт, что каждая ветвь МСЗ, соединяющая узлы «н» и «к», участвует в формировании четырех элементов матрицы проводимостей  $Y_{14}$  следующим образом. Перед началом формирования матрицы  $Y_{14}$  все ее элементы должны быть равны нулю ( $0+j0$ ) с учетом того, что их элементы являются в расчетах УР комплексными числами.

Далее выбираются одноименные элементы «н» – «к» из треугольной табл. 2 и соответствующая проводимость  $Y_{i,j}$  из аналогичной позиции табл. 3. Далее проводятся следующие вычислительные операции:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{n,n} &\rhd \underline{Y}_{n,n} + \underline{Y}_{ij}; \quad \underline{Y}_{k,k} \rhd \underline{Y}_{k,k} + \underline{Y}_{ij}; \\ \underline{Y}_{n,k} &\rhd \underline{Y}_{n,k} - \underline{Y}_{ij}; \quad \underline{Y}_{k,n} \rhd \underline{Y}_{k,n} - \underline{Y}_{ij}. \end{aligned}$$

Здесь символ « $\rhd$ » имеет смысл присвоения, т.е. вычисления проводятся в правой части каждого выражения, а результат записывается по адресу, указанному в правой части. Эти операции делаются в цикле по всем элементам треугольных таблиц.

Приведенное позволяет сформировать общую эквивалентную схему замещения, включающую в себя источник питания, ДВЛ и ее нагрузку (рис. 5).

Теперь, используя матрицы: проводимостей, учитывающие продольные процессы  $Y_{14}$ ; проводимостей половины зарядных поперечных емкостей  $V_{14}$  (продольные емкости не учитываются в силу принятых допущений, что отражено нулевыми элементами в этой матрице в позициях, соответствующих продольным связям) и проводимостей, моделирующих источники питания и нагрузки  $Y_{и,н}$ ,

Таблица 2

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11	1-12	1-13	1-14
	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10	2-11	2-12	2-13	2-14
		3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12	3-13	3-14
			4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	4-10	4-11	4-12	4-13	4-14
				5-6	5-7	5-8	5-9	5-10	5-11	5-12	5-13	5-14
					6-7	6-8	6-9	6-10	6-11	6-12	6-13	6-14
						7-8	7-9	7-10	7-11	7-12	7-13	7-14
							8-9	8-10	8-11	8-12	8-13	8-14
								9-10	9-11	9-12	9-13	9-14
									10-11	10-12	10-13	10-14
										11-12	11-13	11-14
											12-13	12-14
												13-14

Таблица 3

$Y_{Ан,Ак}$	$Y_{Ан,Вн}$	$Y_{Ан,Вк}$	$Y_{Ан,Сн}$	$Y_{Ан,Ск}$	$Y_{Ан,ан}$	$Y_{Ан,ак}$	$Y_{Ан,ан}$	$Y_{Ан,бк}$	$Y_{Ан,сн}$	$Y_{Ан,ск}$	$Y_{Ан,Тн}$	$Y_{Ан,Тк}$
	$Y_{Ак,Вн}$	$Y_{Ак,Вк}$	$Y_{Ак,Сн}$	$Y_{Ак,Ск}$	$Y_{Ак,ан}$	$Y_{Ак,ак}$	$Y_{Ак,ан}$	$Y_{Ак,бк}$	$Y_{Ак,сн}$	$Y_{Ак,ск}$	$Y_{Ак,Тн}$	$Y_{Ак,Тк}$
		$Y_{Вн,Вк}$	$Y_{Вн,Сн}$	$Y_{Вн,Ск}$	$Y_{Вн,ан}$	$Y_{Вн,ак}$	$Y_{Вн,ан}$	$Y_{Вн,бк}$	$Y_{Вн,сн}$	$Y_{Вн,ск}$	$Y_{Вн,Тн}$	$Y_{Вн,Тк}$
			$Y_{Вк,Сн}$	$Y_{Вк,Ск}$	$Y_{Вк,ан}$	$Y_{Вк,ак}$	$Y_{Вк,ан}$	$Y_{Вк,бк}$	$Y_{Вк,сн}$	$Y_{Вк,ск}$	$Y_{Вк,Тн}$	$Y_{Вк,Тк}$
				$Y_{Сн,Ск}$	$Y_{Сн,ан}$	$Y_{Сн,ак}$	$Y_{Сн,ан}$	$Y_{Сн,бк}$	$Y_{Сн,сн}$	$Y_{Сн,ск}$	$Y_{Сн,Тн}$	$Y_{Сн,Тк}$
					$Y_{Ск,ан}$	$Y_{Ск,ак}$	$Y_{Ск,ан}$	$Y_{Ск,бк}$	$Y_{Ск,сн}$	$Y_{Ск,ск}$	$Y_{Ск,Тн}$	$Y_{Ск,Тк}$
						$Y_{ан,ак}$	$Y_{ан,ан}$	$Y_{ан,бк}$	$Y_{ан,сн}$	$Y_{ан,ск}$	$Y_{ан,Тн}$	$Y_{ан,Тк}$
							$Y_{ак,ан}$	$Y_{ак,бк}$	$Y_{ак,сн}$	$Y_{ак,ск}$	$Y_{ак,Тн}$	$Y_{ак,Тк}$
								$Y_{бн,бк}$	$Y_{бн,сн}$	$Y_{бн,ск}$	$Y_{бн,Тн}$	$Y_{бн,Тк}$
									$Y_{бк,сн}$	$Y_{бк,ск}$	$Y_{бк,Тн}$	$Y_{бк,Тк}$
										$Y_{сн,ск}$	$Y_{сн,Тн}$	$Y_{сн,Тк}$
											$Y_{ск,Тн}$	$Y_{ск,Тк}$
												$Y_{Тн,Тк}$

можно сформировать матрицу узловых проводимостей  $Y_y$ , которая позволяет составить уравнения состояния ДВЛ по методу узловых напряжений в виде

$$\underline{Y}_y \underline{U} = (\underline{Y}_{14} + \underline{B}_{14} + \underline{Y}_{и.н}) \underline{U} = \underline{E} \underline{Y}_и \quad (9)$$

Раскром матрицы, использованные в уравнении (9):

$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$	$Y_{1,3}$	$Y_{1,4}$	$Y_{1,5}$	$Y_{1,6}$	$Y_{1,7}$	$Y_{1,8}$	$Y_{1,9}$	$Y_{1,10}$	$Y_{1,11}$	$Y_{1,12}$	$Y_{1,13}$	$Y_{1,14}$
$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$	$Y_{2,3}$	$Y_{2,4}$	$Y_{2,5}$	$Y_{2,6}$	$Y_{2,7}$	$Y_{2,8}$	$Y_{2,9}$	$Y_{2,10}$	$Y_{2,11}$	$Y_{2,12}$	$Y_{2,13}$	$Y_{2,14}$
$Y_{3,1}$	$Y_{3,2}$	$Y_{3,3}$	$Y_{3,4}$	$Y_{3,5}$	$Y_{3,6}$	$Y_{3,7}$	$Y_{3,8}$	$Y_{3,9}$	$Y_{3,10}$	$Y_{3,11}$	$Y_{3,12}$	$Y_{3,13}$	$Y_{3,14}$
$Y_{4,1}$	$Y_{4,2}$	$Y_{4,3}$	$Y_{4,4}$	$Y_{4,5}$	$Y_{4,6}$	$Y_{4,7}$	$Y_{4,8}$	$Y_{4,9}$	$Y_{4,10}$	$Y_{4,11}$	$Y_{4,12}$	$Y_{4,13}$	$Y_{4,14}$
$Y_{5,1}$	$Y_{5,2}$	$Y_{5,3}$	$Y_{5,4}$	$Y_{5,5}$	$Y_{5,6}$	$Y_{5,7}$	$Y_{5,8}$	$Y_{5,9}$	$Y_{5,10}$	$Y_{5,11}$	$Y_{5,12}$	$Y_{5,13}$	$Y_{5,14}$
$Y_{6,1}$	$Y_{6,2}$	$Y_{6,3}$	$Y_{6,4}$	$Y_{6,5}$	$Y_{6,6}$	$Y_{6,7}$	$Y_{6,8}$	$Y_{6,9}$	$Y_{6,10}$	$Y_{6,11}$	$Y_{6,12}$	$Y_{6,13}$	$Y_{6,14}$
$Y_{7,1}$	$Y_{7,2}$	$Y_{7,3}$	$Y_{7,4}$	$Y_{7,5}$	$Y_{7,6}$	$Y_{7,7}$	$Y_{7,8}$	$Y_{7,9}$	$Y_{7,10}$	$Y_{7,11}$	$Y_{7,12}$	$Y_{7,13}$	$Y_{7,14}$
$Y_{8,1}$	$Y_{8,2}$	$Y_{8,3}$	$Y_{8,4}$	$Y_{8,5}$	$Y_{8,6}$	$Y_{8,7}$	$Y_{8,8}$	$Y_{8,9}$	$Y_{8,10}$	$Y_{8,11}$	$Y_{8,12}$	$Y_{8,13}$	$Y_{8,14}$
$Y_{9,1}$	$Y_{9,2}$	$Y_{9,3}$	$Y_{9,4}$	$Y_{9,5}$	$Y_{9,6}$	$Y_{9,7}$	$Y_{9,8}$	$Y_{9,9}$	$Y_{9,10}$	$Y_{9,11}$	$Y_{9,12}$	$Y_{9,13}$	$Y_{9,14}$
$Y_{10,1}$	$Y_{10,2}$	$Y_{10,3}$	$Y_{10,4}$	$Y_{10,5}$	$Y_{10,6}$	$Y_{10,7}$	$Y_{10,8}$	$Y_{10,9}$	$Y_{10,10}$	$Y_{10,11}$	$Y_{10,12}$	$Y_{10,13}$	$Y_{10,14}$
$Y_{11,1}$	$Y_{11,2}$	$Y_{11,3}$	$Y_{11,4}$	$Y_{11,5}$	$Y_{11,6}$	$Y_{11,7}$	$Y_{11,8}$	$Y_{11,9}$	$Y_{11,10}$	$Y_{11,11}$	$Y_{11,12}$	$Y_{11,13}$	$Y_{11,14}$
$Y_{12,1}$	$Y_{12,2}$	$Y_{12,3}$	$Y_{12,4}$	$Y_{12,5}$	$Y_{12,6}$	$Y_{12,7}$	$Y_{12,8}$	$Y_{12,9}$	$Y_{12,10}$	$Y_{12,11}$	$Y_{12,12}$	$Y_{12,13}$	$Y_{12,14}$
$Y_{13,1}$	$Y_{13,2}$	$Y_{13,3}$	$Y_{13,4}$	$Y_{13,5}$	$Y_{13,6}$	$Y_{13,7}$	$Y_{13,8}$	$Y_{13,9}$	$Y_{13,10}$	$Y_{13,11}$	$Y_{13,12}$	$Y_{13,13}$	$Y_{13,14}$
$Y_{14,1}$	$Y_{14,2}$	$Y_{14,3}$	$Y_{14,4}$	$Y_{14,5}$	$Y_{14,6}$	$Y_{14,7}$	$Y_{14,8}$	$Y_{14,9}$	$Y_{14,10}$	$Y_{14,11}$	$Y_{14,12}$	$Y_{14,13}$	$Y_{14,14}$

В матрице  $Y_{и.н}$  трехфазная система предвключенных сопротивлений (индекс «прв») источников питания задается в соответствии с общепринятой методикой [1]. В частности, для определенности эти сопротивления можно найти по мощностям питающих трансформаторов (автотрансформаторов). Трехфазная система сопротивлений, имитирующих нагрузку ДВЛ, задается в соответствии с



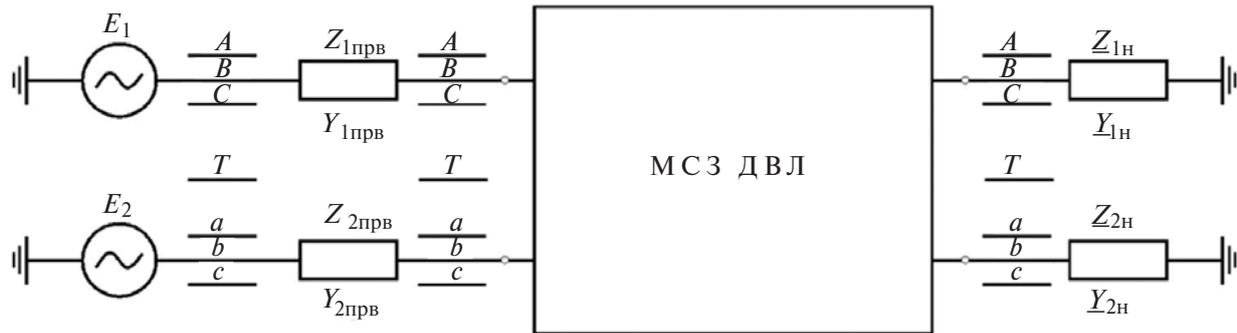


Рис. 5. Эквивалентная схема для расчета режима ДВЛ

Решая уравнения (9), получим значения всех узловых напряжений, а по ним, соответственно, все параметры режима ДВЛ.

С точки зрения присоединения ДВЛ к источникам питания и нагрузкам, а также поступления в нее электрической мощности в соответствии с [1] рассматриваются четыре возможных режима ее работы:

- общие шины в начале – общие шины в конце;
- общие шины в начале – разные шины в конце;
- разные шины в начале – общие шины в конце;
- разные шины в начале – разные шины в конце.

На рис. 1, 2 представлен наиболее общий четвертый случай. Нетрудно видеть, что конкретный вид трех других и необходимые изменения в расчетных схемах можно сформировать по рис. 1, соединяя шины источников и нагрузок, и соответствующими очевидными изменениями в математических описаниях. Кроме того, в трех последних случаях, как уже было сказано, потоки мощности в каждой из цепей могут отличаться друг от друга по значению, так и по направлению.

В приведенных режимах потокораспределение по цепям определяется совокупностью трех факторов:

- источниками и предвключенными сопротивлениями в начале ДВЛ;
- внутренними сопротивлениями ДВЛ и взаимными связями цепей;
- нагрузками (сопротивлениями) в конце ДВЛ.

Общая эквивалентная схема (рис. 5) с учетом приведенного ранее составляется в виде следующего комплекса моделей.

*Модель источника питания (системы)* строится по общепринятой схеме в виде ЭДС с напряжением источника питания и предвключенного сопротивления, которое приближенно определяется по мощности питающего трансформатора (автотрансформатора).

*Модель ДВЛ* строится для наиболее общего четвертого режима по схеме полного четырехугольни-

ка в узловой  $Y$ -форме (рис. 2) с отдельными источниками питания и приемниками.

*Модель нагрузки*, как уже было сказано выше, определяется в виде постоянного сопротивления по приближенному значению мощности нагрузки для каждой цепи и по среднему значению номинального напряжения ДВЛ.

Для оценки погрешностей методов расчета режима работы линии электропередачи с учетом и без учета взаимных влияний цепей целесообразно использовать в качестве характерных показателей потери активной мощности и падения напряжения.

В настоящее время в сетях ЕНЭС лишь малая доля линий электропередачи снабжена устройствами телемеханики и телеизмерений, а расчет электрических режимов для них проводится исключительно с использованием ОСЗ.

В связи с этим возникает необходимость в оценке погрешностей, к которым приводит применение несовершенных методов расчета. Такая оценка была проведена на примере габаритов линий Сызрань I–II, класс напряжения 220 кВ, входящих в энергосистему МЭС Волги.

Погрешность в результатах расчета электрических режимов при использовании однопроводных схем замещения обусловлена, главным образом, пренебрежением принципиальной несимметричностью первичных параметров ДВЛ. Строго говоря, несимметричным объектом является не только ДВЛ, но и любая трехфазная одноцепная ВЛ, для которой не предусмотрена транспозиция. Существенный вклад в несимметрию первичных параметров ВЛ вносит взаимодействие электромагнитных полей, создаваемых фазными токами с землей, особенно для сетей 110 кВ и выше, работающих в режиме глухозаземленной нейтрали. Также значительную роль играет факт наличия грозозащитного троса и схема его заземления.

Отметим, что при симметричной конструкции опор ДВЛ значения режимных параметров в каждой из цепей будут одинаковыми, в то время как для ДВЛ, выполненных на одноцепных опорах,

они будут существенно различаться из-за отсутствия геометрической оси плоской симметрии.

Из рис. 6,а можно видеть, что увеличение расстояния, на которое передаётся мощность при неизменном  $\cos \varphi$ , приводит к синхронному возрастанию абсолютной погрешности в определении потерь активной мощности в каждой из цепей.

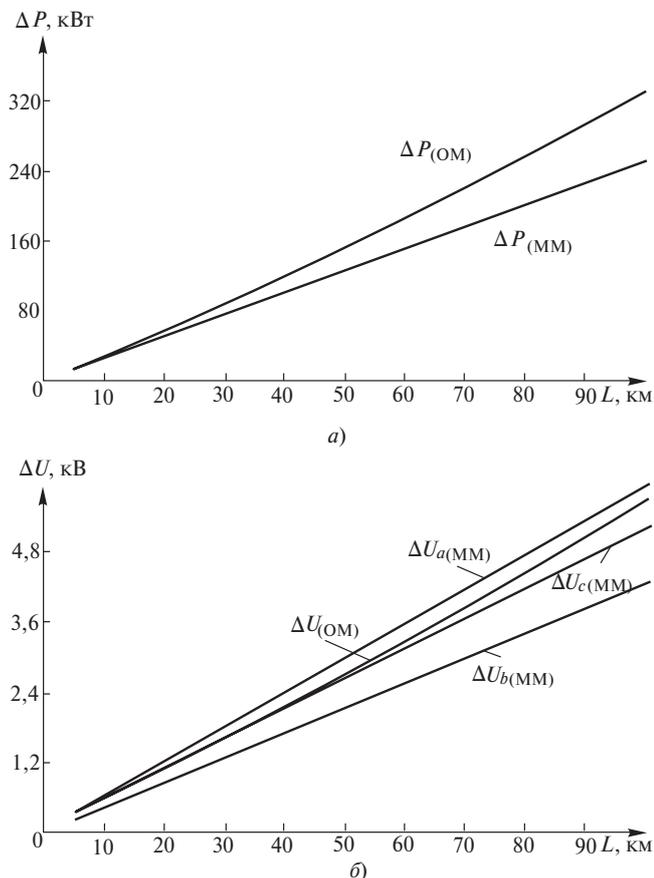


Рис. 6. Потери активной мощности в ДВЛ (а) и падение напряжения в фазных проводах ДВЛ (б) в зависимости от длины линии, определенные с использованием однопроводных (ОМ) и многопроводных (ММ) схем замещения

Различия в определении падения напряжения в фазных проводах ДВЛ (рис. 6,а) зависят от положения провода на траверсе опоры: а именно, от расстояния траверсы до точки подвеса грозозащитного троса, до земли и до соседней траверсы.

Наиболее высокие значения относительной погрешности при определении падения напряжения возникают в проводах центральных траверс, особенно сильно воспринимающих электромагнитное и электростатическое влияние близкорасположенных соседних проводов. Необходимо отметить, что в каждой из фаз значения относительных погрешностей отличаются по знаку, и при переходе от фазных величин к линейным возникает лишь небольшое искажение треугольника потерь.

Относительная погрешность в определении потерь активной мощности (рис. 7,а) и падения на-

пряжения в фазах (рис. 7,б) с увеличением протяжённости ВЛ линейно возрастает.

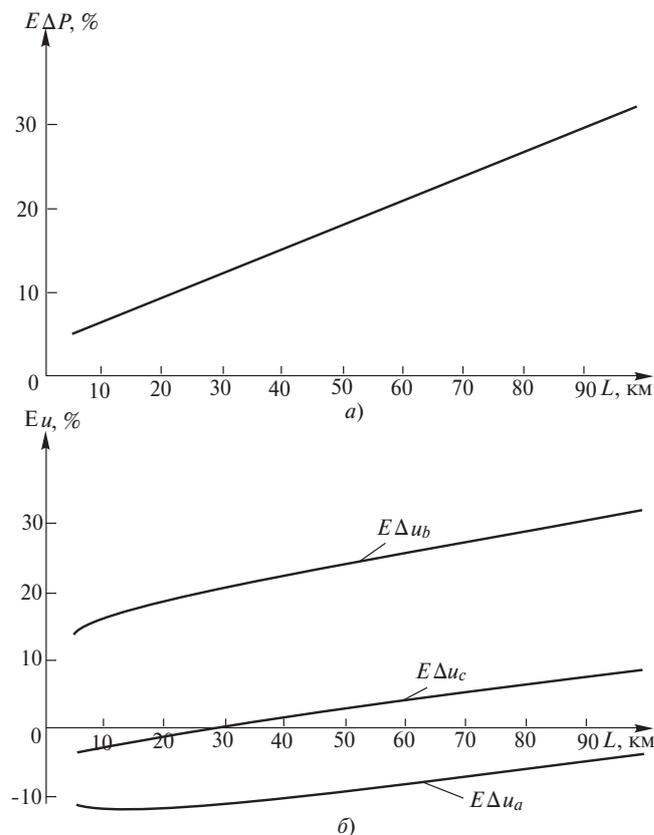


Рис. 7. Относительная погрешность в определении потерь активной мощности в цепях ДВЛ (а) и падения напряжения в фазных проводах цепей ДВЛ (б) при использовании ОСЗ в зависимости от длины передачи

**Выводы.** Приведенные исследования с использованием разработанной методики расчета установившегося режима показали, что пренебрежение принципиальной несимметричностью ДВЛ при расчёте электрических режимов приводит к появлению неучтённой несимметрии по напряжению, выражающейся в коэффициенте несимметрии по обратной последовательности, достигающем 0,5 % в классе напряжения 220 кВ.

Кроме того, пренебрежение взаимовлиянием цепей ДВЛ и линий, находящихся в общем коридоре, приводит к возникновению знакопеременных погрешностей в оценке падения напряжения в фазных проводах, достигающих в среднем 25 % по абсолютному значению в классе напряжения 220 кВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М.; Л.: Энергия, 1964.
2. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники, изд. 4, доп. Т. 2. — СПб: Питер, 2006.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. — М.: Гардарики, 2006.

4. **Гринберг Г.А.** Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948.

5. **Астахов Ю.Н., Веников В.А., Зуев Э.Н.** Повышение пропускной способности за счет рационального размещения проводов двухцепных линий электропередачи. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1965, № 6.

6. **Мисриханов М.Ш., Попов В.Д., Якимчук Н.Н. Медов Р.В.** Взаимовлияние двухцепных воздушных линий и их воздействие на режим электрических систем. — Электрические станции, 2001, № 2.

7. **Евдокунин Г.А., Чуйков Ю.В., Щербачев О.В.** О целесообразном расположении фаз двухцепных воздушных линий для снижения пофазной несимметрии. — Электрические станции, 1980, № 3.

[06.09.12]

*Авторы: Шишков Евгений Михайлович окончил электротехнический факультет Самарского государственного технического университета (СамГТУ) в 2011 г. по специальности «электрические системы и сети». Аспирант, ассистент кафедры «Электрические станции» СамГТУ.*

*Ведерников Александр Сергеевич окончил электротехнический факультет СамГТУ в 2000 г. по специальности «Электрические системы и сети». Защитил кандидатскую диссертацию «Метод квадратичного кумулятивного осреднения в расчетах резкопеременных графиков электрических нагрузок» в СамГТУ в 2004 г. Заведующий кафедрой «Электрические станции» СамГТУ.*

*Гольдштейн Валерий Геннадьевич окончил электротехнический факультет Куйбышевского политехнического института в 1963 г. по специальности «Электрические станции, сети и системы». В 2004 г. защитил докторскую диссертацию «Электромагнитная совместимость систем электроснабжения нефтяной промышленности при внешних и внутренних импульсных электромагнитных воздействиях» в СамГТУ. Профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» СамГТУ.*