

ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ПРОВОДАХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В статье анализируется токораспределение в системе проводов расщепленных фаз линий электропередачи на основе методики решетчатых схем замещения. Показано, что определение режимов таких линий методом симметричных составляющих приводит к значительным погрешностям, связанным в первую очередь с расчетами потерь в линиях. Основным источником погрешностей является наличие несимметричных отрезков линии при осуществлении цикла транспозиции проводов.

**Ключевые слова:** линии электропередачи, расщепленные фазы, фазные координаты, токораспределение

Введение. Использование расщепленных фаз является эффективным средством уменьшения потерь на корону и снижения неблагоприятного экологического воздействия высоковольтных ЛЭП на окружающую среду. Такие ЛЭП обычно используют при напряжениях 330 кВ и выше. Известны случаи применения расщепленных фаз с целью снижения радиопомех и акустического шума, а также для повышения пропускной способности линий напряжением 110 и 220 кВ [1]. Совершенствование способов эксплуатации ЛЭП и применение информационных технологий для управления электрическими сетями требует создания гибких моделей линий с расщепленными фазами. Имеющиеся в настоящее время модели предназначены для расчетов режимов в симметричных составляющих [1, 2, 3] и плохо применимы в случаях многократных несимметрий, а также при значительном взаимном влиянии нескольких линий.

Постановка задачи и методика моделирования. При горизонтальном расположении проводов линии их транспозиция не приводит к полному исчезновению несимметрии токов. Фазы такой линии расположены неравнозначно по отношению друг к другу: провод фазы А расположен ближе к проводу с отстающей фазой, а провод фазы С расположен ближе к проводу с опережающей фазой, что приводит к существенным отличиям в зарядах проводов фаз при симметричном напряжении из-за емкостного взаимовлияния и к раз-

личию наводимых в проводах ЭДС из-за магнитного взаимовлияния. В такой ситуации нетранспонированные отрезки ЛЭП, составляющие транспонированную линию, оказываются в существенно несимметричном режиме, что сказывается как в токах проводов фазы, так и в токах фаз, а также и в потерях активной мощности в линиях; в частности, этот эффект описан для шинопроводов и токопроводов [4, 5]. Метод симметричных составляющих не учитывает таких эффектов, усиливающихся при повышении класса напряжения и увеличении числа проводов в фазе.

В статье рассматриваются результаты анализа режимов ЛЭП с расщепленными фазами с применением для моделирования методики решетчатых схем замещения [6], позволяющей не только производить расчеты режимов при многократных несимметриях и взаимовлияниях линий, но и оценивать токораспределение в проводах расщепленных фаз.

Линии электропередачи и трансформаторы разных типов представляют собой статические многопроводные элементы (СМЭ) из нескольких проводов или обмоток, обладающих взаимной электромагнитной связью (рис. 1). Если вынести соединения этих проводов (обмоток) за пределы рассматриваемого СМЭ, то линии и трансформаторы будут отличаться друг от друга только характером взаимоиндуктивной связи между проводами.

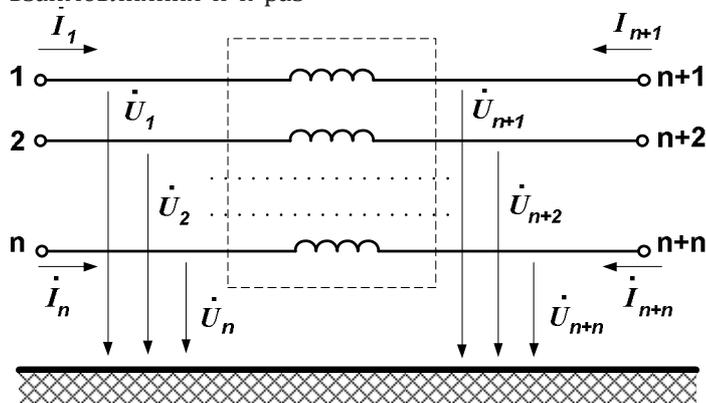


Рис. 1. Обобщенная схема многопроводного элемента электрической сети

\* - автор, с которым следует вести переписку.

Методика моделирования СМЭ решетчатыми схемами замещения сводится к следующему.

На первом этапе моделирования матрица проводимостей, используемая для получения решетчатой схемы СМЭ, формируется без учета фактического соединения отдельных проводов или обмоток на основе следующего преобразования

$$Y_{PC} = M_0 Z^{-1} M_0^T = \begin{bmatrix} D & -D \\ -D & D \end{bmatrix},$$

где  $Y_{PC}$  – матрица размерностью  $n=2r \times 2r$ ;  $Z$  – исходная матрица сопротивлений элемента размерностью  $r \times r$ , учитывающая взаимные индуктивные связи между проводами;  $z_{ik} = z_{ki}$ ;  $D = Z^{-1}$ ;  $r$  – исходное число проводов элемента без учета их соединения;  $M_0$  – топологическая матрица, определяемая на основе соотношения  $M_0 = \begin{bmatrix} E_r \\ -E_r \end{bmatrix}$ ,  $E_r$  – единичная матрица размерностью  $r \times r$ .

При отсутствии в элементе связей с узлом нулевого потенциала (землей), т.е.  $z_{k0} = \infty$ ,  $k=1\dots r$ , матрица  $Y_{PC}$  является  $g$ -кратно вырожденной, что, однако, не препятствует использованию модели в расчетах. Действительно, после формирования расчетной схемы сети путем объединения моделей нескольких элементов и исключения уравнений, отвечающих базисным узлам, матрица проводимостей сети становится хорошо обусловленной.

Для учета емкостных связей необходимо дополнить полученную схему шунтами и ветвями, определяемыми величинами частичных емкостей. Последние можно найти из потенциальных коэффициентов первой группы формул Максвелла:

$$U = AT,$$

где  $U = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_r]^T$  – вектор напряжений проводов-земля,  $T = [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_r]^T$  – вектор зарядов проводов,  $A$  – матрица потенциальных коэффициентов.

На основе матрицы  $B = A^{-1}$  могут быть вычислены собственные и взаимные частичные емкости. При этом матрица  $B$  преобразуется к виду

$$C = \begin{bmatrix} B_1 e^T & -b_{12} & \dots & -b_{1r} \\ -b_{21} & B_2 e^T & \dots & -b_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -b_{r1} & -b_{r2} & \dots & B_r e^T \end{bmatrix}$$

где  $B_k = (b_{k1} \ b_{k2} \ \dots \ b_{kr})$ ,  $k=1\dots r$ ;

$e = (1 \ 1 \ \dots \ 1)$  – вектор-строка размерностью  $r$ , состоящая из единиц.

В узлы решетчатой схемы добавляются шунты, проводимости которых определяются половиной соответствующей собственной емкости. Кроме того, с каждой стороны системы проводов формируются дополнительные ветви с сопротивлениями, рассчитываемыми по половинным значениям соответствующих взаимных емкостей.

В результате матрица  $Y_{PC}$  преобразуется к новому виду, который можно обозначить как  $Y_C$ :

$$Y_C = Y_{PC} - i\omega C_y,$$

$$\text{где } C_y = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix}; \ \omega = 314 \text{ 1/с.}$$

Матрица  $Y_C$ , в отличие от  $Y_{PC}$ , является невырожденной и может непосредственно использоваться в расчетах режимов, например, для схемы, состоящей из одного СМЭ.

На основе схемы соединений проводов конкретного элемента выполняется преобразование матрицы  $Y_C$  путем объединения соответствующих узлов и эквивалентирования образующихся при этом параллельных ветвей решетчатой схемы. Указанное преобразование записывается следующим образом. Предположив без потери общности, что объединяемые узлы имеют последние номера, можно разделить матрицу  $Y_C$  на блоки:

$$Y_C = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_{12} \\ Y_{12}^T & Y_2 \end{bmatrix}.$$

где  $Y_2$  – блок размерностью  $k \times k$ , отвечающий объединяемым узлам.

Тогда преобразованную матрицу  $Y_S$  можно представить в виде

$$Y_S = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_{12} e_k \\ e_k^T Y_{12}^T & e_k^T Y_2 e_k \end{bmatrix},$$

где  $e_k = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$  –  $k$ -мерный вектор, состоящий из единиц.

Описанные модели СМЭ реализованы в программном комплексе Fazonord-Качество [7], предназначенном для моделирования электрических систем и систем тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока с учетом перемещающихся тяговых нагрузок. В комплексе использовано графическое представление расчетных схем с использованием визуальных компонент из набора элементов. Моделируемая система может включать в свой состав воздушные линии различного конструктивного исполнения, одножильные и трехжильные кабели, трехстержневые и пятистержневые трехфазные трансформаторы с любым соединением обмоток, асинхронную нагрузку.

Результаты моделирования. С помощью комплекса Fazonord-Качество проанализированы режимы работы линий двух типов: компактной воздушной линии с десятью проводами АС-240/56 в каждой фазе (рис. 2), распределение зарядов на проводах которой описано в работе [3], и типовой ЛЭП-500 с горизонтальным расположением фаз и тремя проводами АС-300 в каждой фазе.

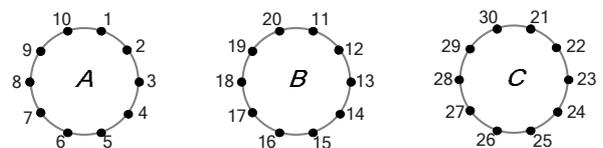
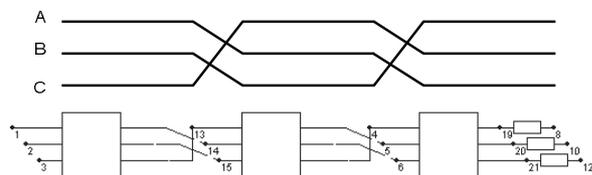


Рис. 2. Расположение проводов компактной ЛЭП

Для линии 10АС-240 проведено моделирование участка длиной 100 км при напряжении 230.4 кВ тремя отрезками линии для выполнения транспозиции (рис. 3) и нагрузками в виде трех одинаковых резистивных элементов по 1000 Ом с заземленными правыми узлами. Для ЛЭП ЗАС-300 с входным напряжением 502.3 кВ смоделирован участок длиной 300 км с тремя элементами ЛЭП по 100 км и сопротивлениями нагрузок 3000 Ом.



**Рис. 3. Исходная схема ЛЭП и расчетная схема комплекса Fazonord-Качество**

Для каждого варианта линии выполнены следующие расчеты:

- определение режима холостого хода для расчета зарядных токов фаз и отдельных проводов, связанных с зарядами очевидным соотношением  $i = j\omega q$ , где  $\omega = 314$  рад/с; полученные величины зарядов сопоставлялись с относительными зарядами проводов расщепленных фаз, представленных в работе [3], где относительный заряд определялся отношением абсолютного заряда провода к предельно допустимому по условиям короны и радиопомех;
- определение мощности емкостной генерации линии и активно-индуктивного сопротивления фазы для проведения сопоставительных расчетов для прямой последовательности;
- сопоставительные расчеты симметричных режимов в фазных координатах и в схеме прямой по-

следовательности для сравнения потерь мощности в разных моделях;

- анализ токораспределения в проводах расщепленных фаз.

Рассчитанные программным комплексом заряды проводов были нормированы к максимальному относительному заряду по данным рис. 22 работы [3], равному 0.92 для провода 18 (номер по рис. 2 данной статьи). Результаты анализа представлены на верхней диаграмме рис. 4.

Полученные результаты отличаются друг от друга не более чем на 10% с меньшими значениями при расчетах на основе комплекса Fazonord-Качество. Сравнительно небольшие различия показывают, что расчеты с помощью комплекса Fazonord-Качество дают корректные результаты. Очевидно, данные работы [3] не отражают несимметрию фаз, поскольку представленные в [3] результаты симметричны относительно проводов 15 и 16.

Активно-индуктивные сопротивления линий были получены расчетом режимов с установкой трех симметричных источников тока в начале линии при заземлении конечных узлов. Малые значения входных напряжений обеспечивали практическое отсутствие влияния емкостной генерации на режим и возможности расчетов входных сопротивлений по отношению напряжений к токам. Для транспонированного участка линии все три входных сопротивления одинаковы и для линии 10АС-240 составили  $1.34 + j11.9$  Ом, а для ЛЭП ЗАС300 –  $10.86 + j96.4$  Ом. Эти значения были использованы для расчетов П-образной схемы прямой последовательности при генерациях каждого трехфазного узла, определенных расчетами режимов холостого хода, равных 26.61 Мвар для ЛЭП 10АС-240 и 144.7 Мвар для ЛЭП ЗАС-300.

Результаты расчетов режимов обеих нагруженных линий представлены в табл. 1.

Таблица 1

Режимные параметры линий

Линия, модель	Фаза	Входное напряжение, кВ	Входной ток, А	Напряжение нагрузки, кВ	Ток нагрузки, А	Потери активной мощности, кВт	Потери реактивной мощности, Мвар
10АС-240, фазные координаты	А	133.0	187.9	133.6	133.6	94.2	-52.5
	В	133.0	188.1	133.6	133.6		
	С	133.0	188.4	133.6	133.6		
10АС-240, схема прямой последовательности	–	230.4	188.0	231.4	133.6	89.5	-52.4
ЗАС-300, фазные координаты	А	290.0	344.6	304.2	101.4	1490	-285
	В	290.0	345.0	304.6	101.5		
	С	290.0	346.2	303.9	101.3		
ЗАС-300, схема прямой последовательности	–	502.3	338.4	526.5	101.3	1155	-279

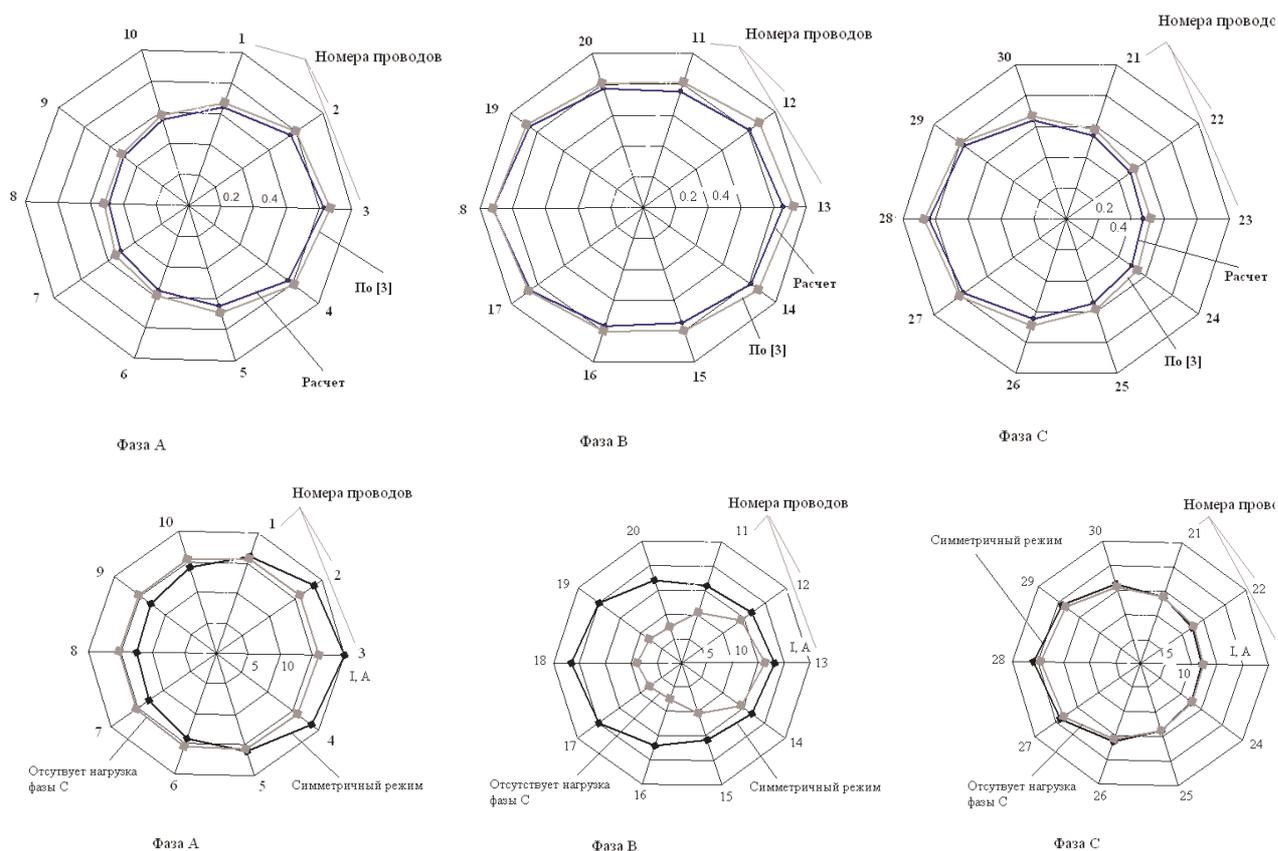


Рис. 4. Расчетные и литературные данные относительных зарядов на ЛЭП 10АС-240 и токораспределение в проводах начала среднего отрезка ЛЭП 10АС-240

Расчеты в фазных координатах и на основе схемы прямой последовательности дают практически одинаковые результаты по режимам, но существенно отличаются по активным потерям в линии. Для линии 220 кВ различие составляет 5%, а для линии 500 кВ различие достигает 23%. Такие различия связаны с существенной несимметрией режимов отрезков ЛЭП, составляющих цикл транспонирования. Так, в конце среднего отрезка ЛЭП 10АС-240 токи проводов составляют 144 А, 149 А, 130 А при значительной неоднородности токов в отдельных проводах расщепленных фаз.

Поскольку токораспределение в проводах зависит от режима соседних фаз, то несимметричные режимы приведут к существенному изменению активных и реактивных потерь с возникновением значительных погрешностей расчетов режима в симметричных составляющих. Эти погрешности тем больше, чем выше напряжение линии и чем больше проводов в расщепленных фазах.

На нижней диаграмме рис. 4 показано распределение токов в началах проводов расщепленных фаз средних отрезков линий. Для ЛЭП 10АС-240 приведено токораспределение для режима с симметричной нагрузкой и для режима с отсутствием нагрузки фазы С (при этом не загружена фаза В среднего отрезка). В последнем случае токи проводов фазы А оказываются практически одинаковыми из-за того, что по про-

водам фазы В протекают сравнительно небольшие емкостные токи. Вместе с тем расчеты показали, что неоднородность токораспределения в проводах фазы линии ЗАС-300 сравнительно невелика (рис. 5 – токи в проводах верхней фазы по рис. 3 начала среднего отрезка линии, узел 13).

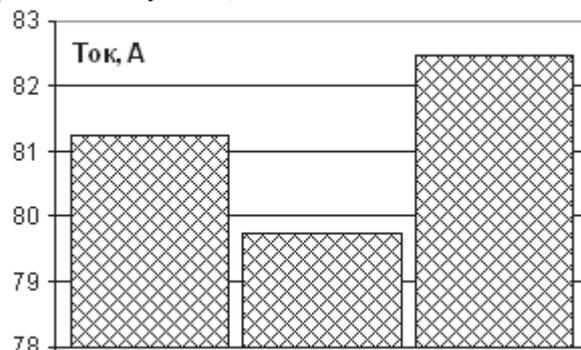
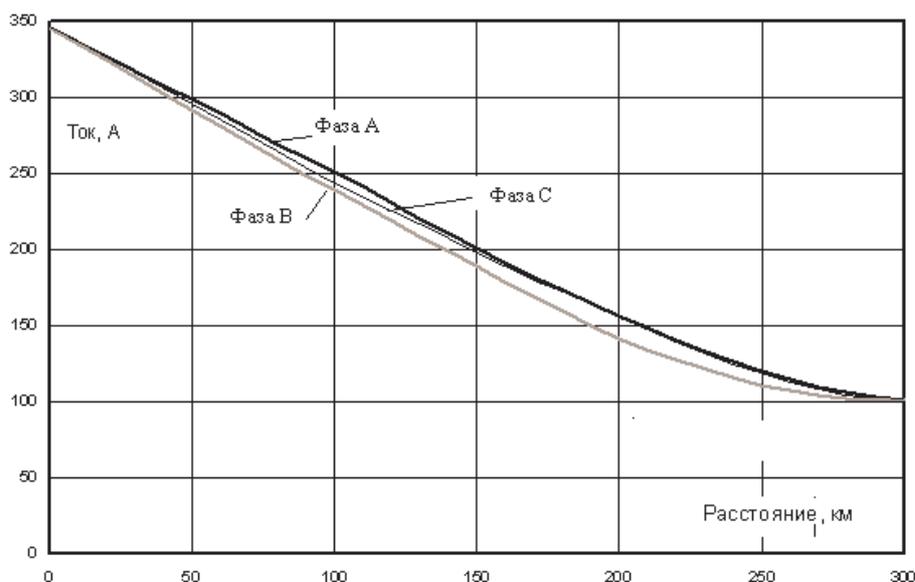
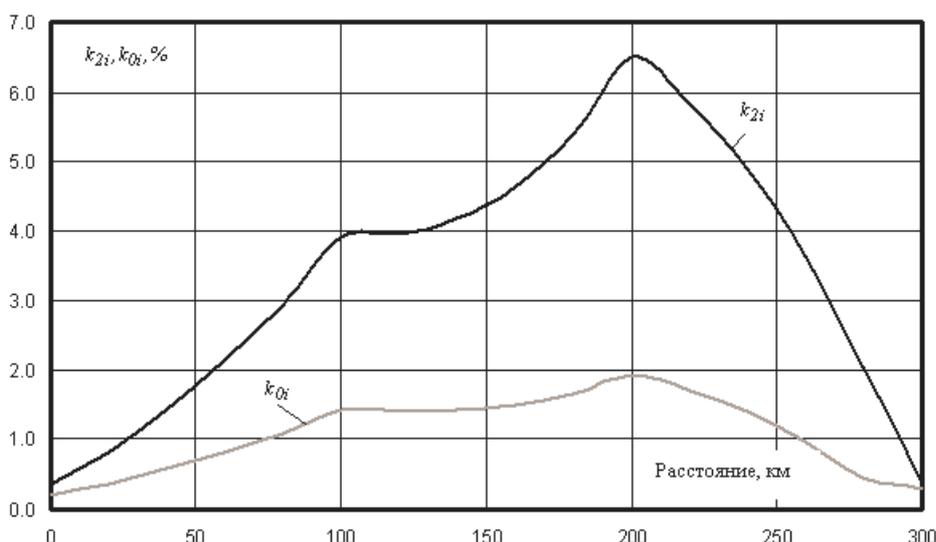


Рис. 5. Токораспределение в проводах фазы начала среднего отрезка ЛЭП ЗАС-300

С целью изучения распределения токов по длине ЛЭП проведено моделирование режимов линии ЗАС-300 при разбиении ее на 15 участков длиной по 20 км. Результаты моделирования представлены на рис. 6 и 7. На этих рисунках показан характер распределения фазных токов по длине ЛЭП, а также представлены коэффициенты несимметрии токов  $k_{2i}, k_{0i}$  по обратной и нулевой последовательностям.



**Рис. 6. Распределение фазных токов по длине ЛЭП**



**Рис. 7. Продольное распределение коэффициентов несимметрии токов**

Полученные результаты наглядно подтверждают ярко выраженную несимметрию токов, протекающих по ЛЭП, имеющей полный цикл транспозиции, и еще раз указывают на необходимость использования фазных координат для корректного определения потерь мощности и энергии в высоковольтных ЛЭП с несимметричным расположением проводов.

### *Выводы*

Линии электропередачи с горизонтальным расположением проводов обладают внутренней несимметрией даже при осуществлении полного цикла транспозиции. В связи с этим расчеты режимов систем, содержащих линии электропередачи с расщепленными проводами, при большом числе проводов в фазе необходимо производить с использованием решетчатых схем замещения ЛЭП, позволяющих, кроме того, анализировать

токораспределение в проводах фаз с учетом конкретного режима.

Применение симметричных составляющих приводит к большим погрешностям определения потерь в линиях из-за зависимости токораспределения в проводах фазы от конкретного режима.

### *Литература*

1. Александров, Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи / Г.Н. Александров. - СПб.: ЦПКЭ, 2006. - 139 с.
2. Веников, В. А. Электрические системы. Электрические сети / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков [и др.]. - М.: Высш. школа, 1998. - 511 с.
3. Александров, Г. Н. Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах / Г. Н. Александров, Г. А. Евдокунин, Т. В. Лисочкина [и др.]. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. - 232 с.
4. Мукосеев, Ю. Л. Электроснабжение промыш-

ленных предприятий / Ю. Л. Мукосеев. - М.: Энергия, 1973. - 584 с.

5. Чальян, К. М. Методы расчета электромагнитных параметров токопроводов / М. К. Чальян. М.: Энергоатомиздат, 1990. - 280 с.

6. Закарюкин, В. П. Сложноносимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. - Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2005. - 273 с.

7. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов» / Закарюкин В. П., Крюков А. В. – Федер. служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – Зарегистр. 28.06.2007.