

УДК 51-74: 621.311

## Идентификация параметров двухцепной линии электропередачи в фазных координатах<sup>\*</sup>

В.П. ЗАКАРЮКИН<sup>1</sup>, А.В. КРЮКОВ<sup>2</sup>, А.А. КУШОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения, доктор технических наук, профессор. E-mail: zakar49@mail.ru

<sup>2</sup> 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения; РФ, Иркутск, ул. Лермонтова, 83; Иркутский национальный исследовательский технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: and\_kryukov@mail.ru

<sup>3</sup> 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения, аспирант. E-mail: kushovalexey@yandex.ru

Исходные параметры воздушных линий электропередачи (ЛЭП) могут определяться с погрешностями до десятков процентов. Уточнение параметров и получение адекватной реальной условиям математической модели ЛЭП может быть выполнено на основе методов параметрической идентификации, осуществляемой по измерениям комплексов напряжений и токов в начале и в конце линии. Существующие методы идентификации ЛЭП разработаны применительно к трехпроводным ЛЭП и неприменимы для определения параметров двухцепных линий.

В статье представлен возможный подход к идентификации параметров двухцепной линии на основе измерения комплексов напряжений и токов проводов на отправном и приемном концах. Предполагается получение нескольких параметров расчетным путем, поскольку все параметры ЛЭП не могут быть определены на основе измерений. В алгоритме идентификации шестипроводной линии выполняется расчет составляющих сопротивлений проводов и эффективной удельной проводимости земли по исходной режимной информации: 12 модулей и фаз напряжений по концам ЛЭП и 12 модулей и фаз токов. При этом считаются известными следующие параметры каждого провода: омическое сопротивление 1 км, радиус провода, координаты расположения провода с учетом стрелы провеса, площадь сечения, длина ЛЭП, ориентировочная удельная проводимость земли по трассе расположения линии. При идентификации предполагается, что ЛЭП не имеет повреждений и погрешности измерений параметров нагрузочного режима не превышают 0.5 %, 0.5°. Метод предполагает корректировку фаз напряжений и токов на приемном конце линии, а при наличии тока нулевой последовательности – определение эффективной удельной проводимости земли.

На основе компьютерного моделирования, выполненного с помощью программного комплекса Fazonord, разработанного в ИРГУПСе, показана применимость метода для практического определения параметров двухцепных линий.

**Ключевые слова:** электроэнергетические системы, двухцепные линии электропередачи, фазные координаты, моделирование линий, решетчатые схемы замещения, учет емкостных и

---

<sup>\*</sup> Статья получена 01 июля 2015 г.

индуктивных связей, идентификация модели по измерениям напряжений и токов, погрешности идентификации, проверка адекватности модели

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-4-140-151

## ВВЕДЕНИЕ

Развиваемая в последнее время концепция «умных» сетей как за рубежом [1–3], так и в России [4–6] открывает ряд новых возможностей контроля и расчета режимов электрических систем [7]. В число новых возможностей входит и определение параметров линий электропередачи (ЛЭП) через напряжения и токи, измеряемые в начале и в конце линии. Вместе с тем методы идентификации параметров ЛЭП разрабатываются в основном для определения симметричных составляющих сопротивлений линий [8–10].

Разработки авторов статьи в части применения моделей многопроводных систем в виде решетчатых схем замещения [11–14] позволяют идентифицировать параметры моделей ЛЭП в фазных координатах. К настоящему времени методы идентификации разработаны применительно к трехпроводным линиям [15, 16], в то время как определение параметров двухцепных трехфазных линий электропередачи важно с точки зрения взаимовлияния отдельных цепей друг на друга. Решение последней задачи в рамках концепции симметричных составляющих чрезвычайно затруднено ввиду возможной транспозиции проводов цепей и неопределенного расположения проводов отдельных фаз на опорах. Уточнение параметров и получение адекватной реальным условиям математической модели ЛЭП может быть выполнено на основе методов параметрической идентификации, осуществляемой по измерениям комплексов напряжений и токов в начале и в конце линии.

## 1. МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ

При определении параметров двухцепной трехфазной ЛЭП некоторые сложности возникают из-за наличия на линии грозозащитных тросов (ГТ). Такие тросы могут быть смонтированы только на части линии и могут иметь одну или несколько точек заземления в пределах анкерного участка. Согласно «Правилам устройства электроустановок», п. 2.5.120, тросы на каждом анкерном участке линий 110...750 кВ длиной до 10 км должны быть заземлены в одной точке. На подходах к подстанциям ГТ заземляются на каждой опоре. Фактор влияния полностью или частично установленных ГТ на емкостные параметры линии может быть учтен при расчете собственных емкостных проводимостей через измеренные комплексы токов и напряжений. То же касается и влияния заземленных в нескольких точках ГТ на продольные сопротивления. Кроме того, ввиду малости участков с замкнутыми контурами трос–земля влияние ГТ на продольные сопротивления будет небольшим. Указанные факторы позволяют обойтись при идентификации шестипроводной моделью по рис. 1, которую можно использовать для ЛЭП с тросами и без них.



Алгоритм идентификации включает следующие этапы.

1. Определение потенциальных коэффициентов системы проводов длиной 1 км по заданным геометрическим размерам:

$$\alpha_{ii} = 1.80 \cdot 10^7 \ln \frac{200 h}{r_k}, \text{ км/Ф}; \quad \alpha_{ij} = 1.80 \cdot 10^7 \ln \frac{D}{d}, \text{ км/Ф},$$

где  $h$  – высота провода над землей с учетом стрелы провеса  $h_p$  (на  $\frac{2}{3}h_p$  ниже высоты точки крепления у опоры), м;  $D, d$  – расстояния от провода  $i$  до изображения провода  $j$  и до самого провода  $j$ , м;  $r_k$  – радиусы проводов отдельной цепи ЛЭП, см,  $k = 1, 2$ .

2. Обращение матрицы потенциальных коэффициентов для вычисления собственных и взаимных емкостей  $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1}$ .

3. Вычисление собственных и взаимных емкостей проводов:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \mathbf{e}^T & -b_{12} & \dots & -b_{1n} \\ -b_{21} & \mathbf{B}_2 \mathbf{e}^T & \dots & -b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -b_{n1} & -b_{n2} & \dots & \mathbf{B}_n \mathbf{e}^T \end{bmatrix} \cdot l,$$

где  $\mathbf{B}_k = (b_{k1} \ b_{k2} \ \dots \ b_{kn})$ ,  $k = 1, \dots, n$ ;  $\mathbf{e} = (1 \ 1 \ \dots \ 1)$  – вектор-строка размерностью  $n$ , состоящая из единиц;  $n$  – число проводов многопроводной системы.

4. Шесть собственных емкостных проводимостей определяются из измеренных комплексов напряжений  $\dot{U}_1, \dots, \dot{U}_{12}$  и токов  $\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_{12}$  в начале и конце линии:

$$\underline{y}_{k0} = \frac{\dot{I}_k'' + \dot{I}_{k+6}''}{\dot{U}_k + \dot{U}_{k+6}}, \quad k = 1, \dots, 6;$$

$$\dot{I}_k'' = \dot{I}_k - \sum_{i=1, i \neq k}^6 (\dot{U}_k - \dot{U}_i) \underline{y}_{ki}; \quad \dot{I}_{k+6}'' = \dot{I}_{k+6} - \sum_{i=1, i \neq k}^6 (\dot{U}_{k+6} - \dot{U}_{i+6}) \underline{y}_{ki}.$$

5. Рассчитываются токи проводов за вычетом токов емкостных добавок (эти токи определяют в принятой модели взаимноиндуктивные связи):

$$\dot{I}_k' = \dot{I}_k'' - \dot{U}_k \underline{y}_{k0}; \quad \dot{I}_{k+6}' = \dot{I}_{k+6}'' - \dot{U}_{k+6} \underline{y}_{k0}; \quad \dot{I}_k' = -\dot{I}_{k+6}'; \quad k = 1, \dots, 6.$$

6. Вычисляются составляющие собственных сопротивлений проводов, не зависящие от удельной проводимости земли:

$$\underline{Z}_{o11} = 0.001 f + j f [0.01148 - 0.001256 \ln(r_1 \sqrt{0.02 f})], \text{ Ом/км},$$

$$\underline{Z}_{o12} = 0.001 f + j f [0.01148 - 0.001256 \ln(r_2 \sqrt{0.02 f})], \text{ Ом/км},$$

где  $f$  – частота, Гц;  $r_1, r_2$  – эквивалентный радиус проводов каждой цепи, см.

Сопротивления 1 км проводов двух трехфазных цепей

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{o11} + \underline{Z}_{in11} - \underline{Z}_{g1},$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{o12} + \underline{Z}_{in12} - \underline{Z}_{g1}$$

содержат составляющую  $\underline{Z}_{g1} = jf0.000628 \ln \gamma$ , Ом/км;  $\gamma$  – удельная проводимость земли, См/м;  $\underline{Z}_{in1} = R_{in1} + jX_{in1}$  – внутреннее сопротивление провода, Ом/км.

Составляющая  $\underline{Z}_{g1}$  при наличии тока нулевой последовательности рассчитывается на следующих шагах алгоритма.

7. Определяются 15 слагаемых взаимных сопротивлений проводов:

$$\underline{Z}_{Mik} = 0.001 f + j f [0.005693 - 0.001256 \ln(d_{ik} \sqrt{0.02 f})], \text{ Ом/км,}$$

где  $d_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}$  – расстояние между проводами  $i$  и  $k$  с координатами  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_k, y_k)$ , м.

Сопротивление взаимоиндуктивной связи между парой проводов содержит тот же член  $\underline{Z}_{g1}$ :

$$\underline{Z}_{ik} = \underline{Z}_{Mik} - \underline{Z}_{g1}.$$

8. Для частичной корректировки погрешностей режимной информации определяется корректирующий фазовый множитель для напряжений и токов конца линии  $\underline{e}$ .

Если в токах хотя бы одной цепи присутствует заметная составляющая тока нулевой последовательности, то есть

$$|\dot{I}_1' + \dot{I}_2' + \dot{I}_3' + \dot{I}_4' + \dot{I}_5' + \dot{I}_6'| > 0.1 \cdot \text{Max}(|\dot{I}_1'|, |\dot{I}_2'|, |\dot{I}_3'|, |\dot{I}_4'|, |\dot{I}_5'|, |\dot{I}_6'|),$$

то система шести уравнений для определения неизвестных записывается так:

$$\underline{Z}_{o21} \dot{I}_k' - \underline{Z}_{g1} \sum_{i=1}^6 \dot{I}_i' + \frac{e \dot{U}_{k+6}}{l} = \frac{\dot{U}_k}{l} - \sum_{i=1, i \neq k}^6 \underline{Z}_{Mik} \dot{I}_i', k = 1, \dots, 3,$$

$$\underline{Z}_{o22} \dot{I}_k' - \underline{Z}_{g1} \sum_{i=1}^6 \dot{I}_i' + \frac{e \dot{U}_{k+6}}{l} = \frac{\dot{U}_k}{l} - \sum_{i=1, i \neq k}^6 \underline{Z}_{Mik} \dot{I}_i', k = 4, \dots, 6,$$

где  $\underline{Z}_{o21} = \underline{Z}_{o11} + \underline{Z}_{in11} = \underline{Z}_{o11} + R_{in11} + jX_{in11}$ ;  $\underline{Z}_{o22} = \underline{Z}_{o12} + \underline{Z}_{in12}$ .

В состав переменных можно перевести два взаимных сопротивления  $\underline{Z}_{M12}$ ,  $\underline{Z}_{M34}$  и записать следующую систему из шести уравнений:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{o21}\dot{I}_1' - \underline{Z}_{g1}\sum_{i=1}^6\dot{I}_i' + \frac{e\dot{U}_7}{l} + \underline{Z}_{M12}\dot{I}_2' &= \frac{\dot{U}_1}{l} - \sum_{i=3}^6 \underline{Z}_{M1i}\dot{I}_i'; \\ \underline{Z}_{o21}\dot{I}_2' - \underline{Z}_{g1}\sum_{i=1}^6\dot{I}_i' + \frac{e\dot{U}_8}{l} + \underline{Z}_{M12}\dot{I}_1' &= \frac{\dot{U}_2}{l} - \sum_{i=3}^6 \underline{Z}_{M2i}\dot{I}_i'; \\ \underline{Z}_{o21}\dot{I}_3' - \underline{Z}_{g1}\sum_{i=1}^6\dot{I}_i' + \frac{e\dot{U}_9}{l} + \underline{Z}_{M34}\dot{I}_4' &= \frac{\dot{U}_3}{l} - \sum_{i=1, i \neq 3, 4}^6 \underline{Z}_{M3i}\dot{I}_i'; \\ \underline{Z}_{o22}\dot{I}_4' - \underline{Z}_{g1}\sum_{i=1}^6\dot{I}_i' + \frac{e\dot{U}_{10}}{l} + \underline{Z}_{M34}\dot{I}_3' &= \frac{\dot{U}_4}{l} - \sum_{i=1, i \neq 3, 4}^6 \underline{Z}_{M4i}\dot{I}_i'; \\ \underline{Z}_{o22}\dot{I}_k' - \underline{Z}_{g1}\sum_{i=1}^6\dot{I}_i' + \frac{e\dot{U}_{k+6}}{l} &= \frac{\dot{U}_k}{l} - \sum_{i=1, i \neq k}^6 \underline{Z}_{Mik}\dot{I}_i', k = 5, \dots, 6\end{aligned}$$

с неизвестными  $\underline{Z}_{o21}$ ,  $\underline{Z}_{o22}$ ,  $\underline{Z}_{g1}$ ,  $e$ ,  $\underline{Z}_{M12}$ ,  $\underline{Z}_{M34}$ , определяемыми из решения системы.

По найденному  $\underline{Z}_{g1}$  вычисляется удельная проводимость земли:

$$\underline{\gamma} = e^{-\frac{j\underline{Z}_{g1}}{0.000628 f}} = e^{\frac{\text{Im}(\underline{Z}_{g1})}{0.000628 f}} \left( \cos\left(\frac{\text{Re}(\underline{Z}_{g1})}{0.000628 f}\right) - j \sin\left(\frac{\text{Re}(\underline{Z}_{g1})}{0.000628 f}\right) \right).$$

Если ток нулевой последовательности незначителен, т. е.

$$|\dot{I}_1' + \dot{I}_2' + \dot{I}_3' + \dot{I}_4' + \dot{I}_5' + \dot{I}_6'| \leq 0.1 \cdot \text{Max}(|\dot{I}_1'|, |\dot{I}_2'|, |\dot{I}_3'|, |\dot{I}_4'|, |\dot{I}_5'|, |\dot{I}_6'|),$$

то параметр  $\underline{Z}_{g1}$  считается заданным, и для получения определенной системы линейных уравнений в состав неизвестных величин переводится параметр  $\underline{Z}_{M56}$ . Система уравнений при этом следующая:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{o21}\dot{I}_1' + \frac{e\dot{U}_7}{l} + \underline{Z}_{M12}\dot{I}_2' &= \frac{\dot{U}_1}{l} + \underline{Z}_{g1}\sum_{i=1}^6\dot{I}_i' - \sum_{i=3}^6 \underline{Z}_{M1i}\dot{I}_i'; \\ \underline{Z}_{o21}\dot{I}_2' + \frac{e\dot{U}_8}{l} + \underline{Z}_{M12}\dot{I}_1' &= \frac{\dot{U}_2}{l} + \underline{Z}_{g1}\sum_{i=1}^6\dot{I}_i' - \sum_{i=3}^6 \underline{Z}_{M2i}\dot{I}_i';\end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{o21} \dot{I}_3' + \frac{e \dot{U}_9}{l} + \underline{Z}_{M34} \dot{I}_4' = \frac{\dot{U}_3}{l} + \underline{Z}_{g1} \sum_{i=1}^6 \dot{I}_i' - \sum_{i=1, i \neq 3,4}^6 \underline{Z}_{M3i} \dot{I}_i';$$

$$\underline{Z}_{o22} \dot{I}_4' + \frac{e \dot{U}_{10}}{l} + \underline{Z}_{M34} \dot{I}_3' = \frac{\dot{U}_4}{l} + \underline{Z}_{g1} \sum_{i=1}^6 \dot{I}_i' - \sum_{i=1, i \neq 3,4}^6 \underline{Z}_{M4i} \dot{I}_i';$$

$$\underline{Z}_{o22} \dot{I}_5' + \frac{e \dot{U}_{11}}{l} + \underline{Z}_{M56} \dot{I}_6' = \frac{\dot{U}_5}{l} + \underline{Z}_{g1} \sum_{i=1}^6 \dot{I}_i' - \sum_{i=1, i \neq 5,6}^6 \underline{Z}_{M5i} \dot{I}_i';$$

$$\underline{Z}_{o22} \dot{I}_6' + \frac{e \dot{U}_{12}}{l} + \underline{Z}_{M56} \dot{I}_5' = \frac{\dot{U}_6}{l} + \underline{Z}_{g1} \sum_{i=1}^6 \dot{I}_i' - \sum_{i=1, i \neq 5,6}^6 \underline{Z}_{M6i} \dot{I}_i';$$

с неизвестными  $\underline{Z}_{o21}$ ,  $\underline{Z}_{o22}$ ,  $e$ ,  $\underline{Z}_{M12}$ ,  $\underline{Z}_{M34}$ ,  $\underline{Z}_{M56}$ .

После решения системы уравнений корректируются напряжения и токи конца линии:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{7\text{новое}} &= e \dot{U}_7; \dot{U}_{8\text{новое}} = e \dot{U}_8; \dot{U}_{9\text{новое}} = e \dot{U}_9; \dot{U}_{10\text{новое}} = e \dot{U}_{10}; \\ \dot{U}_{11\text{новое}} &= e \dot{U}_{11}; \dot{U}_{12\text{новое}} = e \dot{U}_{12}; \dot{I}_{7\text{новое}} = e \dot{I}_7; \dot{I}_{8\text{новое}} = e \dot{I}_8; \dot{I}_{9\text{новое}} = e \dot{I}_9; \\ \dot{I}_{10\text{новое}} &= e \dot{I}_{10}; \dot{I}_{11\text{новое}} = e \dot{I}_{11}; \dot{I}_{12\text{новое}} = e \dot{I}_{12}. \end{aligned}$$

Поскольку от этих напряжений зависят собственные емкостные проводимости проводов, целесообразно скорректировать токи конца линии и повторить шаги 4...8.

9. По полученным величинам определяются величины сопротивлений:

$$\underline{z}_1 = (\underline{Z}_{o21} - \underline{Z}_{g1})l; \quad \underline{z}_2 = (\underline{Z}_{o22} - \underline{Z}_{g1})l; \quad \underline{z}_{12} = (\underline{Z}_{M12} - \underline{Z}_{g1})l;$$

$$\underline{z}_{34} = (\underline{Z}_{M34} - \underline{Z}_{g1})l; \quad \underline{z}_{56} = (\underline{Z}_{M56} - \underline{Z}_{g1})l.$$

10. Формируется решетчатая схема замещения линии. Для этого обращается матрица сопротивлений

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{z}_1 & \dots & \underline{z}_{16} \\ \dots & \dots & \dots \\ \underline{z}_{16} & \dots & \underline{z}_2 \end{bmatrix}$$

и составляется матрица решетчатой схемы

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} -\underline{Z}^{-1} & \underline{Z}^{-1} \\ \underline{Z}^{-1} & -\underline{Z}^{-1} \end{bmatrix}.$$

Проводимость ветви между узлами  $i, k$  равна значению элемента матрицы  $\underline{Y}_{ik}$ ; к ней для узлов с текущего конца линии добавляется половина взаимной емкостной проводимости проводов  $i$  и  $k$ . В узлы решетчатой схемы замещения добавляются реактивные шунты, равные половине собственной емкостной проводимости провода. Общее количество ветвей итоговой решетчатой схемы равно 66.

## 2. ПРИМЕР ИДЕНТИФИКАЦИИ

Алгоритм предполагает два варианта идентификации:

- с оценкой удельной проводимости земли при наличии существенного тока нулевой последовательности;
- определение дополнительной взаимной индуктивности пары проводов.

В качестве исходных параметров режима использованы результаты моделирования режима шестипроводной линии программным комплексом Fazonord, разработанным в ИрГУПС. Приведенный в табл. 1 исходный режим соответствует варианту с заметным током нулевой последовательности. Результаты идентификации первичных параметров линии представлены в табл. 2. Этими параметрами являются собственная емкостная проводимость первого провода линии  $\underline{Y}_{10}$ , составляющая  $\underline{Z}_{011}$  полного сопротивления контура первый провод–земля, взаимное индуктивное сопротивление  $\underline{Z}_{m12}$  между 1 км первого и второго проводов линии, входные сопротивления первой цепи линии прямой и нулевой последовательностей:  $R_1 + jX_1$ ,  $R_0 + jX_0$ .

Таблица 1

Исходный режим двухцепной линии с токами нулевой последовательности

Номер узла	Угол $\dot{U}$ , °	Модуль $\dot{U}$ , кВ	Модуль $\dot{I}$ , А	Угол $\dot{I}$ , °
1	0	133,00	61,04	-17,31
2	-120,0	133,00	58,59	-126,87
3	120,0	133,00	65,53	112,15
4	0	133,00	184,23	-34,36
5	-120,0	133,00	39,00	-31,24
6	120,0	133,00	35,82	-153,67
7	-2,83	125,81	79,49	140,30
8	-121,79	136,89	73,05	21,34
9	121,44	130,71	76,51	-95,43
10	-4,47	121,45	205,85	138,66
11	-121,07	140,21	0	-125,66
12	122,46	132,97	0	-130,64



Таблица 2

**Результаты идентификации при наличии токов нулевой последовательности**

Параметр	$\underline{Y}_{10}$ , мкСм/км	$\underline{Z}_{011}$ , Ом/км	$\underline{Z}_{m12}$ , Ом/км	$R_1$ , Ом	$X_1$ , Ом	$R_0$ , Ом	$X_0$ , Ом
Идентификация	$-0,0003 + j0,5218$	$0,153 + j0,727$	$0,0092 - j0,0007$	10,95	43,02	39,51	222,5
По исходным данным	$0 + j0,5216$	$0,157 + j0,723$	0,01	10,97	42,91	40,15	222,2
Различия модулей, %	0,0	0,4	-7,9	-0,2	0,3	-1,6	0,1

Наличие заметного тока нулевой последовательности приводит к высокой точности определения первичных параметров линии.

**ВЫВОДЫ**

1. Предложена методика параметрической идентификации двухцепных линий электропередачи, обеспечивающая корректировку измерений при неодновременных замерах по концам ЛЭП.

2. Результаты компьютерного моделирования показали высокую точность определения первичных параметров ЛЭП: максимальная погрешность расчета сопротивлений прямой и нулевой последовательностей не превышает 1,6 %. Кроме того, моделирование показало, что использование идентифицированных параметров обеспечивает высокую точность расчета режимов. Модули напряжений и токов отличаются от исходных на доли процентов, а углы – на несколько минут.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Chow J.H. Power system measurement data and their applications // European Transactions on Electrical Power. – 2011. – Vol. 21, iss. 4. – P. 1493–1495.
2. Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized phasor measurements and their applications. – Boston, Massachusetts: Springer Science+Business Media, 2008. – 248 p.
3. Vanfretti L., Chow J.H. Synchrophasor data applications for wide-area system // 17<sup>th</sup> Power System Computation Conference, Stockholm, Sweden, 22–26 August 2011. – Stockholm, 2011. – Vol. 2. – P. 1390–1398.
4. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: Энергия, 2010. – 208 с.
5. Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л. Технологическая платформа Smart Grid (основные средства) // Энергоэксперт. – 2009. – № 4. – С. 42–49.
6. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. – 2009. – № 4. – С. 29–34.
7. Novosel D., Vu K. Benefits of PMU technology for various applications [Electronic resource] // 7<sup>th</sup> CIGRE Symposium for power system management, 5–8 November 2006. – URL: [http://www.ieee.hr/\\_download/repository/Pozivno\\_predavanja\\_Novosel\\_Vu\\_Cigre\\_06.pdf](http://www.ieee.hr/_download/repository/Pozivno_predavanja_Novosel_Vu_Cigre_06.pdf) (accessed: 28.12.2015).

8. Transmission line parameter identification using PMU measurements / D. Shi, D.J. Tylavsky, K.M. Koellner, N. Logic, D.E. Wheeler // *European Transactions on Electrical Power*. – 2011. – Vol. 21, iss. 4. – P. 1574–1588.

9. Беляков Ю.С. К вопросу идентификации параметров воздушных линий электропередачи // *Электричество*. – 2008. – № 6. – С. 18–23.

10. Шелюг С.Н. Методы адаптивной идентификации параметров схемы замещения элементов электрической сети: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2000. – 23 с.

11. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. – Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 2005. – 273 с.

12. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. – Иркутск: ИрГУПС, 2011. – 160 с.

13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Abramov N.A. Electro energetic technological control in Eastern Siberia Railway // *Journal of Energy and Power Engineering*. – 2012. – Vol. 6, N 2. – P. 293–299.

14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Simulation of power systems with four-phase power transmission lines // *Power Technology and Engineering*. – 2014. – Vol. 48, N 1. – P. 57–61.

15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shulgin M.S. Parametric identification of power grid elements based on phase measurements // *Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future. Proceedings*. – Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2012. – Vol. 1. – P. 1–4.

16. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация линий электропередачи и трансформаторов. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 95 с.

*Закарюкин Василий Пантелеймонович*, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог. Имеет более 300 публикаций. E-mail: zakar49@mail.ru.

*Крюков Андрей Васильевич*, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог. Имеет более 600 публикаций. E-mail: and\_kryukov@mail.ru.

*Кушов Алексей Александрович*, аспирант кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог. Имеет 8 публикаций. E-mail: kushovalexey@yandex.ru.

### **Identification of double-circuit transmission line parameters in phase coordinates\***

V.P. ZAKARYUKIN<sup>1</sup>, A.V. KRYUKOV<sup>2</sup>, A.A. KUSHOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskaya St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, D.Sc.(Eng.), professor. E-mail: zakar49@mail.ru

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskaya St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, D.Sc.(Eng.), professor. E-mail: and\_kryukov@mail.ru

<sup>3</sup> Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskaya St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, postgraduate. E-mail: kushovalexey@yandex.ru

Initial parameters of high voltage overhead transmission lines can be determined with an error of up to tens of percent. The improvement of parameters and obtaining a mathematical model of an overhead power transmission line suitable to real conditions can be performed on the basis of parametrical identification methods which are carried out based on the measurements of voltages and currents at the beginning and the end of the line. However, the existing methods of line identification are developed for three-wire high voltage lines and cannot be applied to determine parameters of double-circuit transmission lines.

A possible approach to the identification of double-circuit line parameters based on measuring voltages and currents of wires at the starting and reception ends is presented in the article. Some parameters of the line are supposed to be obtained by calculation because all parameters of the high voltage line cannot be determined on the basis of measurements. In the algorithm of six-wire line identification the calculation of wire resistance and effective ground conductivity components is made based on the initial mode information, namely, 12 voltage modules and voltage phases and 12 modules and current phases at the line ends. Thus the following data of each wire are considered known: the 1 km line ohmic resistance, each wire radius, wire arrangement coordinates taking into account the sag, the section area, the line length, and an approximate ground conductivity along the line length. At identification it is supposed that the high voltage line has no damages and measurement errors of under-load operation do not exceed 0.5% and 0.5°. The method assumes the correction of voltages and currents at the line reception end and the determination of effective ground conductivity if a zero-sequence current flows.

On the basis of computer modeling performed by the Fazonord software package developed in the Irkutsk State Transport University the applicability of the method for determining practical parameters of two-chain lines is shown.

**Keywords:** Electric power systems; double-circuit transmission lines; phase domain; line modeling; lattice equivalent circuits; capacitive and inductive links; model identification by voltages and currents; identification errors; model adequacy check

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-4-140-151

### **REFERENCES**

1. Chow J.H. Power system measurement data and their applications. *European Transactions on Electrical Power*, 2011, vol. 21, iss. 4, pp. 1493–1495.
2. Phadke A.G., Thorp J.S. *Synchronized phasor measurements and their applications*. Boston, Massachusetts, Springer Science+Business Media, 2008. 248 p.
3. Vanfretti L., Chow J.H. Synchrophasor data applications for wide-area system. *17<sup>th</sup> Power System Computation Conference*, Stockholm, Sweden, 22–26 August 2011, vol. 2, pp. 1390–1398.

---

\*Received 01 July 2015.

4. Kobets B.B., Volkova I.O. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* [Innovation development of electro energetics on Smart Grid concept]. Moscow, Energiya Publ., 2010. 208 p.
5. Shakaryan Yu.G., Novikov N.L. Tekhnologicheskaya platforma Smart Grid (osnovnye sredstva) [Smart Grid technological platform (basic means)]. *Energoekspert – Energoexpert*, 2009, no. 4, pp. 42–49.
6. Dorofeev V.V., Makarov A.A. Aktivno-adaptivnaya set' – novoe kachestvo EES Rossii [Active adaptive net – new quality of Russian Energy System]. *Energoekspert – Energoexpert*, 2009, no. 4, pp. 29–34.
7. Novosel D., Vu K. Benefits of PMU technology for various applications. *7<sup>th</sup> CIGRE Symposium for power system management*, 5–8 November 2006. Available at: [http://www.ieee.hr/\\_download/repository/Pozivno\\_predavanja\\_Novosel\\_Vu\\_Cigre\\_06.pdf](http://www.ieee.hr/_download/repository/Pozivno_predavanja_Novosel_Vu_Cigre_06.pdf) (accessed 28.12.2015)
8. Shi D., Tylavsky D.J., Koellner K.M., Logic N., Wheeler D.E. Transmission line parameter identification using PMU measurements. *European Transactions on Electrical Power*, 2011, vol. 21, iss. 4, pp. 1574–1588.
9. Belyakov Yu.S. K voprosu identifikatsii parametrov vozdushnykh linii elektropereдачи [About transmission line parameters' identification]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2008, no. 6, pp. 18–23. (In Russian)
10. Shelyug S.N. *Metody adaptivnoi identifikatsii parametrov skhemy zameshcheniya elementov elektricheskoi seti*: avtoref. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods of adaptive identification of electric net elements' parameters. PhD eng. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2000. 23 p.
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhnoesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem* [Asymmetrical modes of electric systems]. Irkutsk, Irkutskii universitet Publ., 2005. 273 p.
12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* [Methods of joint modeling of railroad traction and external power supply systems of alternating current]. Irkutsk, ISTU Publ., 2011. 160 p.
13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Abramov N.A. Electro energetic technological control in Eastern Siberia Railway. *Journal of Energy and Power Engineering*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 293–299.
14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Simulation of power systems with four-phase power transmission lines. *Power Technology and Engineering*, 2014, vol. 48, no. 1, pp. 57–61.
15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. Parametric identification of power grid elements based on phase measurements. *Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future. Proceedings*. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, 2012, pp. 1–4.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. *Parametricheskaya identifikatsiya linii elektropereдачи i transformatorov* [Parametrical identification of transmission lines and transformers]. Irkutsk, ISTU Publ., 2012. 95 p.